Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Клочков Юрий Сергеевич
Должность: Ректор
Дата подписания: 15.10.2026 14:55:22
Уникальный программный ключ:
3beb265d5d589e7ff4c954946f3ad99a1e70ac12

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
**«ТЮМЕНСКИЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**
**Институт сервиса и отраслевого управления**

Кафедра «Промышленная теплоэнергетика»

# РАСЧЕТ ЦИКЛА ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Методические рекомендации
к выполнению расчетно-графической работы
по дисциплине «Техническая термодинамика»
для студентов направления подготовки
13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»
очной и заочной форм обучения

Составители
***Е. О. Антонова***
***кандидат технических наук, доцент***
***Н. В. Рыдалина***

Тюмень
ТИУ
2018

Расчет поршневого двигателя внутреннего сгорания: методические рекомендации для выполнения расчетно-графической работы по дисциплине «Техническая термодинамика» для студентов направления подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» очной и заочной форм обучения / сост. Антонова Е. О., Рыдалина Н. В.; Тюменский индустриальный университет. – Тюмень: Издательский центр БИК, ТИУ, 2017. – 32 с.

Методические рекомендации рассмотрены и рекомендованы к изданию на заседании кафедры «Промышленная теплоэнергетика»
«20» февраля 2018 года, протокол №19

## Аннотация

Методические рекомендации для выполнения расчетно-графической работы по дисциплине «Техническая термодинамика» предназначены для студентов направления подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника». Данная дисциплина изучается в двух семестрах.

Методические рекомендации включают в себя краткую теоретическую справку, по теоретическому материалу, необходимому для выполнения расчетно-графической работы. Приведен подробный разбор примера расчёта термодинамических циклов поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС), рекомендуемых в качестве домашнего задания для обучающихся. Предложены вопросы для самопроверки, с целью подготовки к защите работы.

**Содержание**

ВВЕДЕНИЕ ..... 4
ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТНО - ГРАФИЧЕСКОЙ ПО ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИМ ЦИКЛАМ ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ..... 5
ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ ..... 6
Основные понятия и расчётные соотношения ..... 6
Газовые смеси ..... 7
Теплоёмкость ..... 7
Показатель адиабаты ..... 8
Первое начало термодинамики ..... 8
Термодинамические процессы ..... 8
Второе начало термодинамики ..... 9
Круговой процесс (цикл) ..... 9
Термодинамические циклы поршневых ..... 11
двигателей внутреннего сгорания ..... 11
ЗАДАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ ..... 13
ПРИМЕР РАСЧЁТА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ЦИКЛА ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ..... 17
ЛИТЕРАТУРА ..... 29
Приложение 1 ..... 30
Приложение 2 ..... 31

# ВВЕДЕНИЕ

Расчетно-графическая работа по термодинамическим циклам тепловых двигателей достаточно полно отражает основные части курса технической термодинамики и для его выполнения обучающимся следует освоить следующие разделы:

- идеальный газ и смеси идеальных газов;
- теплоёмкость;
- первое начало термодинамики;
- термодинамические процессы изменения состояния;
- круговые процессы;
- второе начало термодинамики;
- термодинамические циклы тепловых двигателей (поршневых двигателей внутреннего сгорания).

В предлагаемых методических указаниях приводится краткая теоретическая справка, по теоретическому материалу, необходимому для выполнения расчетно-графической работы. Приведен подробный разбор примера расчёта термодинамических циклов поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС), рекомендуемых в качестве домашнего задания для обучающихся.

Выполнение домашнего задания позволит закрепить теоретический материал, получаемый на лекциях и в результате самостоятельной проработки части курса, применить его к решению практической задачи - исследованию термодинамических циклов тепловых двигателей.

# ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТНО - ГРАФИЧЕСКОЙ ПО ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИМ ЦИКЛАМ ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

До начала выполнения расчётно-графической работы обучающемуся надо уяснить цель и смысл задания и усвоить материал, излагаемый на лекциях и в учебниках [1, 2, 3, 8].

Все вычисления должны быть изложены подробно. Формулы записываются в общем виде, затем подставляются числовые значения величин (в системе СИ) и только после этого приводится результат расчёта. Необходимый графический материал - термодинамические циклы в различных координатах - следует изображать на миллиметровке в формате А4.

Домашнее задание оформляется на отдельных листах формата А4 или тетради.

Обучающиеся, которые правильно сделали и оформили задание, допускаются к защите. При защите они должны свободно отвечать на вопросы, связанные с теоретическими основами, методикой расчёта задания.

Для подготовки к защите домашнего задания рекомендуется ответить на вопросы, предлагаемые в конце пособия.

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В понятие расчёта газового цикла входит:

- расчёт газовой смеси: определения массового состава $m_i$, кажущейся молекулярной массы смеси $\mu_{см}$, характеристической газовой постоянной смеси $R_{см}$;

- определения параметров состояния $P$, $V$, $T$ в характерных точках цикла;

- расчёт средних массовых теплоёмкостей смеси $c_{pm_{\text{смеси}}}$ и $c_{vm_{\text{смеси}}}$, для каждого процесса;

- определение для каждого процесса, входящего в цикл, функций состояния; изменения внутренней энергии $\Delta u$, изменения энтальпии $\Delta h$, изменения энтропии $\Delta s$ и функций процесса: количество подведённого (отведённого) тепла q, термодинамической $L$ и потенциальной $W$ работ.

- определение работы цикла $L_ц$ и термического коэффициента полезного действия $\eta_ц$;

- построения цикла в PV и TS координатах.

Методические указания иллюстрируются примером расчёта газового цикла. Все расчёты ведутся в удельных величинах, отнесённых к 1 кг рабочего тела (газовой смеси), которое считается идеальным газом.

Выполнение расчетно-графической работы при выполнении домашнего задания преследует цель научиться правильно использовать системы единиц измерения и умело применять для расчёта цикла теоретический материал.

### Основные понятия и расчётные соотношения

При проведении расчётов термодинамических циклов тепловых двигателей принято считать, что рабочим телом в них является идеальный газ. Это позволяет использовать закономерности для идеальных газовых смесей, что хотя и снижает точность расчёта, но позволяет значительно облегчить вычисления и не отражается на особенностях протекания термодинамических циклов. Поэтому воспользуемся уравнением состояния идеального газа.

$$Pv=RT$$

где $P$ - абсолютное давление, Па; $v$ - удельный объём, м$^3$ /кг; $T$ - абсолютная температура, К; $R$ - характеристическая газовая постоянная, Дж/(кг. К),

$$R = \frac{\bar{R}}{\mu} \qquad (1)$$

где $\bar{R}$ - универсальная газовая постоянная, 8314 Дж/(кмоль. К), $\mu$ - молекулярная масса газа, кг/кмоль.

## Газовые смеси

Рабочим телом большинства тепловых машин является смесь газов. Состав газовой смеси определяется количеством ($M_i$, $V_i$) каждого из газов - компонентов, входящих в смесь, и задаётся массовыми $m_i$, или объёмными $r_i$ долями.

Для смеси идеальных газов, если смесь задана массовыми концентрациями, молекулярная масса смеси:

$$\mu_i = 1 \Big/ \sum_{i=1}^{n} (m_i / \mu_i) \qquad (2)$$

где $m_i = G_i / G$; $G$ - масса смеси, кг; $m_i$, $\mu_i$, $G_i$ - массовой концентрация, молекулярная масса (кг/кмоль) и масса (кг) $i$ - го компонента.

Тогда газовая постоянная смеси газов:

$$R_{см} = \overline{R} / \mu_{см} \quad \text{или} \quad R_{см} = \sum_{i=1}^{n} m_i R_i \qquad (3)$$

Формулы для расчёта газовых смесей приведены в таблице №1.

Таблица №1

| Задание состава смеси | Перевод из одного состава в другой | Кажущаяся молекулярная масса смеси | Газовая постоянная смеси |
|---|---|---|---|
| Массовые доли $m_i = \frac{M_i}{M_{см}}$ | $r_i \frac{\frac{m_i}{\mu_i}}{\sum \frac{m_i}{\mu_i}}$ | $\mu_{см} = \frac{1}{\sum \frac{m_i}{\mu_i}}$ | $R_{см} = \sum m_i R_i$ |
| Объёмные доли $r_i = \frac{V_i}{V_{см}}$ | $m_i = \frac{r_i \mu_i}{\sum r_i \mu_i}$ | $\mu_{см} = \sum r_i \mu_i$ | $R_{см} = \frac{8314}{\sum r_i \mu_i}$ |

## Теплоёмкость

Теплоёмкость газа зависит от температуры. По этому признаку различают среднюю и истинную теплоёмкости. Если q - количество теплоты, подведённого (отведённого) к единице количества вещества при изменении его температуры от $t_1$ до $t_2$, то величина $C_m = q/(t_2 - t_1)$ - средняя теплоёмкость в пределах температур от $t_1$ до $t_2$. Предел этого отношения, когда разность температур стремится к нулю, называют истиной теплоемкостью $C_{pм}^{см}$ и $C_{vм}^{см}$.

Для газов важное значение имеют теплоёмкости в процессах изобарном ($C_{pm}$) и изохорном ($C_{vm}$),которые связаны между собой законом Майера

$$C_{pm} - C_{vm} = R \qquad (4)$$

Для вычисления средних теплоёмкостей в диапазоне температур от $t_1$

до $t_2$ пользуются формулой:

$$C_m\Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{C_m\Big|_0^{t_2} t_2 - C_m\Big|_1^{t_1} t_1}{t_2 - t_1} \tag{5}$$

где $C_m\Big|_0^t$ - средняя теплоёмкость газа в интервале температур от 0°С до t°С, она может быть мольной, объёмной или массовой как при постоянном давлении, так и при постоянном объёме.

Средняя массовая теплоёмкость смеси определяется:

$$C_m^{cm} = \sum m_i C_{mi} \tag{6}$$

где $C_{mi}$ - средняя массовая теплоёмкость i - го компонента.

## Показатель адиабаты

Идеальных газов

$$k = C_{pm} / C_{\upsilon m} \tag{7}$$

Значения молекулярных масс и характеристических газовых постоянных ($\mu_i$, $R_i$) компонентов смеси выбираются из табл.6. Значения изобарных и изохорных теплоёмкостей, $C_{pmi}$ и $C_{vmi}$, следует выбирать по таблицам при заданной температуре которые приведены в таблицах приложения.1 и 2.

## Первое начало термодинамики

Аналитическое выражение первого начала термодинамики для конечного изменения состояния 1кг газа имеет вид:

$$q_{1-2} = \Delta u + l_{1-2} \tag{8}$$

$$q_{1-2} = \Delta h + w_{1-2} \tag{9}$$

Количества тепла $q_{1-2}$ термодинамическая работа $l_{1-2} = \int_1^2 P d\upsilon$ потенциальная работа $W_{1-2} = \int_{P_1}^{P_2} VdP$ являются функциями процесса. Внутренняя энергия U, энтальпии h являются функциями состояния, то есть изменение этих величин не зависит от пути процесса и определяется по следующим формулам:

$$\Delta U = C_{vm}\left(t_2 - t_1\right) \tag{10}$$

$$\Delta h = C_{pm}\left(t_2 - t_1\right) \tag{11}$$

## Термодинамические процессы

Основными процессами, которые изучаются в термодинамике, являются изохорным (V = idem), изометрический (T = idem) и адиабатный ($PV^k$ = idem). Связь между параметрами в процессах и формулы расчета функций состояния и процесса приведены в табл.2. Перечисленные процессы - частные случаи обобщённого процесса, который называется по-

литропным и описывается уравнением $PV^n$ = idem, где n - показатель политропы, который может принимать любые значения от - ∞ до + ∞.

## Второе начало термодинамики

Определяет направление, в котором протекают процессы, устанавливает условия преобразования тепловой энергии в механическую и для обратимых процессов имеет вид:

$$dS = \frac{\delta q}{T} \tag{12}$$

$$\delta q = TdS \tag{13}$$

В технической термодинамике приходится иметь дело не с абсолютным значением энтропии, а с её изменением $\Delta S = \int \frac{\delta q}{T}$.

## Круговой процесс (цикл)

Совокупность термодинамических процессов, в результате осуществления которых рабочего тело возвращается в исходное состояние. Степень совершенства работы цикла характеризуется термическим КПД:

$$\eta_t = \frac{l_ц}{q_1} = \frac{q_1 - |q_2|}{q_1} = 1 - \frac{|q_2|}{q_1} \tag{14}$$

Первое начало термодинамики для цикла имеет вид:

$$\oint \delta q = \oint dU + \oint \delta l = \oint dh + \oint \delta W \tag{15}$$

Внутренняя энергия, энтальпия, энтропия являются функциями состояния, поэтому в круговых процессах изменения этих величин равно нулю.

Следовательно, выражение (15) примет вид:

$$l_ц = \oint \delta q = \oint \delta l = \oint \delta W \tag{16}$$

$$l_ц = \sum q_i = \sum l_i = \sum W_i \tag{17}$$

где $l_ц$ - работа цикла, Дж/кг; $q_i$ - количество подведённой (отведённой) теплоты; $l_i$ - термодинамическая работа; $W_i$ - потенциальная работа; $\Delta U_i$ - изменение внутренней энергии; $\Delta h_i$ - изменение энтальпии; $q_1$ - количество подводимой теплоты, Дж/кг; $q_2$ , - количество отводимой теплоты, Дж/кг.

Таблица №2

Связь между параметрами в процессах

| Наименование процесса | Политропный | Изобарный | Изохорный | Изотермический | Адиабатный |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Уравнение процесса | $PV^n = idem$ | $P=idem$ | $V=idem$ | $PV=idem$ | $PV^k=idem$ |
| Показатель политропы | $n=\frac{W}{l}$ | $n=0$ | $n=\pm\infty$ | $n=1$ | $n=k=\frac{C_{pm}}{C_{vm}}$ |
| Связь между параметрами | $\frac{P_2}{P_1}=\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^n$<br>$\frac{T_2}{T_1}=\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{n-1}$<br>$\frac{T_2}{T_1}=\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}$ | $P_1=P_2$<br>$\frac{T_2}{T_1}=\frac{V_2}{V_1}$ | $V_1=V_2$<br>$\frac{T_2}{T_1}=\frac{P_2}{P_1}$ | $T_1=T_2$<br>$\frac{P_2}{P_1}=\frac{V_1}{V_2}$ | $\frac{T_2}{T_1}=\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1}$<br>$\frac{T_2}{T_1}=\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$ |
| Термодинамическая работа | $l_{1-2}=\frac{P_1V_1-P_2V_2}{n-1}$<br>$l_{1-2}=\frac{R(T_1-T_2)}{n-1}$ | $l_{1-2}=R(T_2-T_1)$<br>$l_{1-2}=P(V_2-V_1)$ | $l_{1-2}=0$ | $l_{1-2}=RT\ln\frac{V_2}{V_1}$<br>$l_{1-2}=RT\ln\frac{P_1}{P_2}$ | $l_{1-2}=\frac{P_1V_1-P_2V_2}{k-1}$<br>$l_{1-2}=\frac{R(T_1-T_2)}{k-1}$ |
| Потенциальная работа | $W_{1-2}=\frac{n(P_1V_1-P_2V_2)}{n-1}$<br>$W_{1-2}=\frac{nR(T_1-T_2)}{n-1}$ | $W_{1-2}=0$ | $W_{1-2}=V(P_1-P_2)$<br>$W_{1-2}=R(T_2-T_1)$ | $W_{1-2}=l_{1-2}$ | $W_{1-2}=\frac{k(P_1V_1-P_2)}{k-1}$<br>$W_{1-2}=\frac{kR(T_1-T_2)}{k-1}$ |
| Теплоёмкость процесса | $C_n=C_{vm}\frac{n-k}{n-1}$ | $C_{pm}$ | $C_{vm}$ | $\infty$ | 0 |
| Количество теплоты | $q_{1-2}=\Delta U+l_{1-2}$<br>$q_{1-2}=\Delta h+W_{1-2}$<br>$q_{1-2}=C_n(T_2-T_1)$ | $q_{1-2}=\Delta U+l_{1-2}$<br>$q_{1-2}=C_{pm}(T_2-$<br>$T_1$ | $q_{1-2}=\Delta h+W_{1-2}$<br>$q_{1-2}=C_{vm}(T_2-$<br>$T_1$ | $q_{1-2}=l_{1-2}=$<br>$W_{1-2}$<br>$q_{1-2}=T\Delta S$ | $q_{1-2}=0$ |

Продолжение табл.№2

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|
| Изменения энтропии | $\Delta S = C_{pm} \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{V_2}{V_1}$<br>$\Delta S = \left( C_{pm} - \frac{R}{n-1} \right) \ln \frac{T_2}{T_1}$<br>$\Delta S = C_n \ln \frac{T_2}{T_1}$ | $\Delta S = C_{pm} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}$ | $\Delta S = C_{vm} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}$ | $\Delta S = R \ln \frac{V_2}{V_1}$<br>$\Delta S = R \ln \frac{P_1}{P_2}$ | $\Delta S = 0$ |

## Термодинамические циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания

В предварительных исследованиях термодинамических циклов поршневых ДВС рассматривают идеализированные циклы. В них процессы сжатия и расширения рабочего тела принимаются адиабатными, а рабочим телом является идеальный газ. Различают циклы с изохорным подводом тепла - цикл Отто (рис. 1а), изобарным подводом - цикл Дизеля (рис. 1б) и со смешанным подводом тепла - цикл Сабатэ - Тринклера (рис. 1 в).

Основными характеристиками термодинамических циклов поршневых ДВС являются: $\varepsilon$ - степень сжатия, $\varepsilon = \upsilon_1 / \upsilon_2$; $\lambda$ - степень повышения давления в процессе подвода тепла при $\upsilon = idem$, $\lambda = P_3 / P_2$; $\rho$ - степень предварительного расширения в процессе подвода тепла при P = idem, $\rho = \upsilon_3 / \upsilon_2$ (для цикла Дизеля), $\rho = \upsilon_4 / \upsilon_3$ (для цикла Сабатэ -Тринклера).

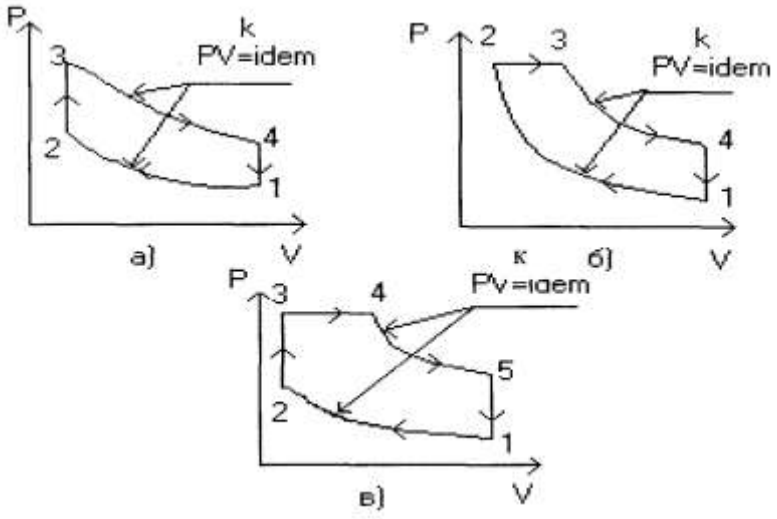



Рисунок 1 . Термодинамические циклы поршневых ДВС:
а) Отто, б) Дизеля, в) Сабатэ - Тринклера

Термический КПД цикла со смешанным подводом тепла определяется по формуле:

$$\eta_t^{C-T} = 1 - \frac{\lambda\rho^k - 1}{\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)} \cdot 1/\varepsilon^{k-1} \quad (18)$$

Анализ формулы (18) свидетельствует, что термодинамический КПД возрастает с повышением степени сжатия $\varepsilon$, показателя адиабаты К, степени повышения давления $\lambda$ и с уменьшением степени предварительного расширения $\rho$.

При одинаковых исходных значениях рабочего тела и степени сжатия

$$\eta_t^O > \eta_t^{C-T} > \eta_t^D \quad (19)$$

Но правомерней сравнивать значения термодинамических КПД в условиях одинаковых максимальных параметров $P_{max}$ и $T_{max}$ - В этом случае

$$\eta_t^D > \eta_t^{C-T} > \eta_t^D \quad (20)$$

Термический КПД циклов ДВС может достигать 60 – 65%.

В реальных двигателях внутреннего сгорания, вследствие не обратимых потерь работы, действительный КПД меньше термического и в среднем составляет 30-40% для дизелей и 20- 30 % для карбюраторных двигателей.

## ЗАДАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

Рассчитать термодинамический цикл поршневого ДВС, если рабочим телом является смесь идеальных газов состава, указанного в индивидуальном задании.

По индивидуальным значениям температуры $\boldsymbol{T}$, давления $\boldsymbol{P}$, объема $\boldsymbol{v}$, степени сжатия $\boldsymbol{\varepsilon}$, степени повышения давления $\boldsymbol{\lambda}$ и степени предварительного расширения $\boldsymbol{\rho}$ выполнить расчет в следующей последовательности.

1. Определить характеристики рабочего тела: массовые доли элементов смеси $\boldsymbol{m_i}$ и газовую постоянную смеси $\boldsymbol{R_{см}}$.

2. Определить термодинамические параметры состояния в характерных точках цикла ***P, v, T*** (вариант 1-21 для точек 1-5; варианты 22-35 для точек 1-4);

3. Определить массовые теплоемкости смеси в каждой точке цикла;

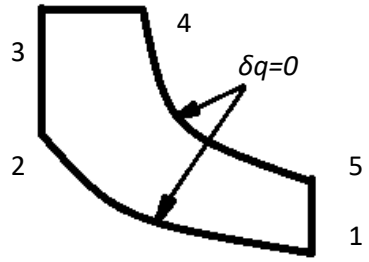
4. Определить массовые теплоемкости для процессов;

5. Определить изменение функций состояния $\boldsymbol{\Delta u, \Delta h, \Delta s,}$ термодинамическую работу цикла $\boldsymbol{l,}$ теплообмен $\boldsymbol{q}$ в каждом из процессов. Вычислить работу $\boldsymbol{l_ц}$ и КПД цикла $\boldsymbol{\eta_ц}$.

6. Изобразить цикл поршневого ДВС в координатах *PV* и *TS*. Для построения использовать промежуточные точки.

Таблица №3

Исходные данные для вариантов 1-22




$\varepsilon = V_1/V_2$
$\lambda = P_3/P_2$
$\rho = V_4/V_3$

| **Задание №** | $\varepsilon$ | $\rho$ | $\lambda$ | № состава смеси | Температура Т, К | Давление Р, МПа | Удельный объем υ, $м^3/кг$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 17 | 1,5 | 1,7 | 5 | $T_i$=350 | - | $\upsilon_5$=0,35 |
| 2 | 16,5 | 1,4 | 1,6 | 9 | 350 | - | 0,3 |
| 3 | 16 | 1,3 | 1,6 | 14 | 300 | - | 0,35 |
| 4 | 17 | 1,3 | 1,7 | 17 | 350 | - | 0,3 |
| 5 | 16,5 | 1,5 | 1,7 | 21 | 300 | - | 0,35 |
| 6 | 17,5 | 1,5 | 1,8 | 5 | $T_2$=850 | $P_2$=5 | - |
| 7 | 17 | 1,4 | 1,7 | 9 | 900 | 5,6 | - |
| 8 | 16,5 | 1,5 | 1,6 | 14 | 820 | 5,6 | - |
| 9 | 17 | 1,4 | 1,8 | 17 | 830 | 5,6 | - |
| 10 | 17,5 | 1,5 | 1,6 | 21 | 850 | 5,6 | - |
| 11 | 18,5 | 1,4 | 1,8 | 5 | $T_4$=2800 | - | $\upsilon_1$=0,3 |
| 12 | 18 | 1,4 | 1,7 | 9 | 2700 | - | 0,3 |
| 13 | 18,5 | 1,35 | 1,7 | 14 | 2600 | - | 0,3 |
| 14 | 18 | 1,35 | 1,9 | 17 | 2500 | - | 0,3 |
| 15 | 18 | 1,3 | 1,9 | 21 | 2400 | - | 0,3 |
| 16 | 20 | 1,4 | 1,6 | 5 | $T_3$=1800 | - | $\upsilon_1$=0,35 |
| 17 | 20 | 1,4 | 1,5 | 9 | 1600 | - | 0,4 |
| 18 | 20 | 1,4 | 1,45 | 14 | 1700 | - | 0,3 |
| 19 | 20 | 1,4 | 1,4 | 17 | 1750 | - | 0,35 |
| 20 | 20 | 1,4 | 1,4 | 21 | 1650 | - | 0,4 |
| 21 | 17 | 1,6 | 1,7 | 1 | 350 | - | 0,35 |

Таблица №4

Исходные данные для вариантов 23-35

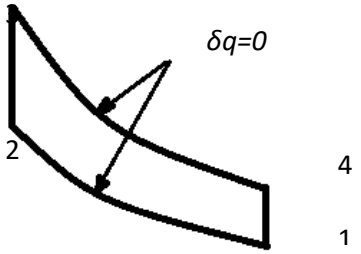
| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
|  | | | | | $\varepsilon=V_1/V_2$<br>$\lambda=P_3/P_2$<br>$\rho=1$ | |
| **Задание №** | $\varepsilon$ | $\lambda$ | Температура Т, К | Давление Р, МПа | Удельный объем ν, $м^3/кг$ | № состава смеси |
| 22 | 9 | 3,4 | $T_2$=750 | - | $\upsilon_4$=1,3 | 8 |
| 23 | 8 | 3,4 | 750 | - | 1,35 | 19 |
| 24 | 8,2 | 3,4 | 800 | - | 1,25 | 26 |
| 25 | 7,5 | 3,4 | 820 | - | 1,3 | 15 |
| 26 | 8,5 | 3,7 | $T_1$=350 | - | 1,35 | 8 |
| 27 | 7,5 | 3,8 | 370 | - | 1,35 | 19 |
| 28 | 8 | 3,8 | 380 | - | 1,35 | 26 |
| 29 | 8,5 | 4 | $T_3$=2500 | - | 1,4 | 8 |
| 30 | 7,5 | 4 | 2400 | - | 1,4 | 19 |
| 31 | 7,6 | 4 | 2450 | - | 1,4 | 26 |
| 32 | 8,2 | 4 | 2300 | - | 1,4 | 15 |
| 33 | 8,2 | 3,9 | $T_2$=700 | $P_2$=0,5 | - | 26 |
| 34 | 8 | 4 | $T_3$=2700 | - | $\upsilon_3$=0,32 | 6 |
| 35 | 8 | 4 | 2700 | - | 0,32 | 7 |

Таблица №5

Состав рабочей смеси в объемных долях

| Газ / № смеси | $O_2$ | $N_2$ | $H_2$ | CO | $CO_2$ | $H_2O$ | Воздух |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0,25 | 0,35 | - | 0,25 | 0,15 | - | - |
| *2* | 0,15 | 0,50 | 0,10 | 0,25 | - | - | - |
| *3* | - | 0,80 | - | - | 0,10 | 0,10 | - |
| 4 | 0,60 | 0,20 | - | 0,20 | - | - | - |
| 5 | 0,35 | - | 0,15 | - | - | - | 0,50 |
| 6 | 0,50 | - | 0,20 | - | 0,30 | - | - |
| 7 | - | 0,50 | 0,10 | - | 0,20 | - | 0,20 |
| 8 | - | - | - | 0,50 | 0,20 | 0,20 | 0,10 |
| 9 | - | - | - | - | 0,30 | 0,30 | 0,40 |
| 10 | - | - | 0,20 | 0,70 | - | - | 0,10 |
| 11 | 0,30 | - | - | - | - | 0,30 | 0,40 |
| 12 | - | 0,20 | - | 0,20 | 0,40 | 0,20 | - |
| 13 | 0,40 | 0,20 | - | - | - | 0,40 | - |
| 14 | - | - | 0,25 | - | 0,25 | - | 0,50 |
| 15 | 0,30 | 0,30 | 0,10 | 0,30 | - | - | - |
| 16 | - | 0,40 | 0,10 | 0,40 | 0,10 | - | - |
| 17 | 0,60 | - | - | 0,20 | - | 0,20 | - |
| 18 | - | 0,35 | 0,05 | 0,20 | - | - | 0,40 |
| 19 | 0,30 | - | 0,20 | - | 0,40 | 0,10 | - |
| 20 | - | - | 0,20 | 0,30 | 0,30 | - | 0,20 |
| 21 | 0,35 | 0,35 | - | - | - | - | 0,30 |
| 22 | 0,10 | 0,10 | - | 0,40 | - | - | 0,40 |
| 23 | - | - | 0,20 | 0,30 | 0,20 | 0,30 | - |
| 24 | 0,25 | 0,25 | - | 0,25 | - | - | 0,25 |
| 25 | - | 0,20 | 0,30 | - | 0,30 | - | 0,20 |
| 26 | 0,15 | - | - | - | 0,20 | 0,40 | 0,25 |
| 27 | 0,35 | 0,35 | - | - | 0,05 | - | 0,25 |
| 28 | - | 0,10 | - | 0,45 | 0,20 | 0,25 | - |
| 29 | 0,40 | 0,40 | - | 0,10 | 0,10 | - | - |
| 30 | - | - | 0,35 | 0,20 | 0,35 | - | 0,10 |

Таблица №6

Характеристики некоторых газов

| **Газ** | **$H_2$** | **$O_2$** | **воздух** | **$N_2$** | **CO** |
|---|---|---|---|---|---|
| R, Дж/кг·К | 4124 | 259.8 | 287 | 296,8 | 296,8 |
| μ,кг/кмоль | 2,016 | 32 | 28,96 | 28,016 | 28,01 |
| $\rho$, кг/м$^3$ | 0,090 | 1,429 | 1,293 | 1,251 | 1,250 |

## ПРИМЕР РАСЧЁТА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ЦИКЛА ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Рассчитать термодинамический цикл поршневого ДВС со смешанным подводом тепла - цикл Сабатэ - Тринклера, если рабочим телом является смесь идеальных газов следующего состава:

азот $r_{N2}$=0,1;

оксид углерода $r_{CO}$=0,45

углекислый газ $r_{CO2}$=0,20;

водяные пары $r_{H2O}$=0,25.

Удельный объем в начале сжатия $\upsilon_1$=0,35м$^3$/кг. Температура в конце предварительного расширения равна $T_4$=2800 К. Степень сжатия $\varepsilon=V_1/V_2=19$, степень повышения давления $\lambda=P_3/P_2=1{,}9$, степень предварительного расширения $\rho= V_4/V_3=1{,}4$.

### Ход работы

1. Определим массовые доли смеси по формуле:

$$m_i = \frac{r_i \cdot \mu_i}{\sum r_i \cdot \mu_i}$$

где $r_i$ - объемная доля компонента смеси; $\mu_i$ - молярная масса компонента смеси.

$$m_{N_2} = \frac{0{,}1 \cdot 28}{0{,}1 \cdot 28 + 0{,}45 \cdot 28 + 0{,}2 \cdot 44 + 0{,}25 \cdot 18} = \frac{2{,}8}{28{,}7} = 0{,}096571 = 0{,}097$$

$$m_{CO} = \frac{0{,}45 \cdot 28}{0{,}1 \cdot 28 + 0{,}45 \cdot 28 + 0{,}2 \cdot 44 + 0{,}25 \cdot 18} = \frac{12{,}6}{28{,}7} = 0{,}439024 = 0{,}439$$

$$m_{CO_2} = \frac{0{,}2 \cdot 44}{0{,}1 \cdot 28 + 0{,}45 \cdot 28 + 0{,}2 \cdot 44 + 0{,}25 \cdot 18} = \frac{12{,}6}{28{,}7} = 0{,}30662 = 0{,}307$$

$$m_{H_2O} = \frac{0{,}25 \cdot 18}{0{,}1 \cdot 28 + 0{,}45 \cdot 28 + 0{,}2 \cdot 44 + 0{,}25 \cdot 18} = \frac{4{,}5}{28{,}7} = 0{,}156794 = 0{,}157$$

Проверка: 0,097+0,439+0,307+0,157=1

Определим газовую постоянную смеси по формуле:

$$R_{\text{смеси}} = \sum m_i \cdot R_i$$

где $R_i$ - газовая постоянная компонента смеси.

$R_{N_2} = \frac{8314}{28} = 296{,}9 \frac{\text{Дж}}{\text{кг·К}}$; $R_{CO} = \frac{8314}{28} = 296{,}9 \frac{\text{Дж}}{\text{кг·К}}$; $R_{CO_2} = \frac{8314}{44} = 189 \frac{\text{Дж}}{\text{кг·К}}$;

$$R_{H_2O} = \frac{8314}{18} = 461{,}9 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$R_{\text{смеси}} = 0{,}097 \cdot 296{,}9 + 0{,}439 \cdot 296{,}9 + 0{,}307 \cdot 189 + 0{,}157 \cdot 461{,}9 = 289{,}7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Газовая постоянная смеси:

$$R_{\text{смеси}} = 289{,}7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Проверка: $R_{\text{смеси}} = \frac{\bar{R}}{\mu_{\text{смеси}}} = \frac{8314}{28{,}7} = 289{,}7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг·К}}$

2. Определить термодинамические параметры состояния в характерных точках цикла.

Известные параметры в точках рекомендуется занести в таблицу, которую необходимо заполнять по мере нахождения параметров.

Таблица №7

Термодинамические параметры состояния в характерных точках цикла

| | Адиабатный процесс | Изохорный процесс | Изобарный процесс | Адиабатный процесс | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Точка 1 | Точка 2 | Точка 3 | Точка 4 | Точка 5 |
| $\upsilon$, м$^3$/кг | 0,35 | 0,018 | 0,018 | 0,026 | 0,35 |
| P, МПа | | 16,5 | 31,45 | 31,45 | |
| T, К | | 1053 | 2000 | 2800 | |

Определим удельные объемы в каждой точке цикла.

Удельный объем в конце сжатия $v_2 = v_1/\varepsilon$=0,35/19= 0,018 м$^3$/кг.

Процесс 2-3 - изохорный, поэтому $v_3 = v_2$= 0,018 м$^3$/кг.

Удельный объем в конце предварительного расширения $v_4 = \rho \cdot v_3$=1,4·0,018=0,026 м$^3$/кг.

Так как процесс 5-1 изохорный, то $v_5 = v_1$=0,35 м$^3$/кг.

Определим из уравнения состояния газа давление в точке 4:

$$P_4 = \frac{R_{\text{смеси}} \cdot T_4}{v_4}$$

$P_4 = \frac{289{,}7 \cdot 2800}{0{,}026}$=31,45 МПа

Так как процесс 3-4 изобарный, то $P_4$=$P_3$=31,45 МПа

По известной степени повышения давления определяется $P_2$=$P_3$/λ=31,45/1,9=16,55 МПа.

Из уравнения состояния газ находятся $T_2$ и $T_3$.

$$T_2 = \frac{P_2 \cdot v_2}{R_{\text{смеси}}} = \frac{16{,}55 \cdot 10^6 \cdot 0{,}018}{289{,}7} = 1053 \text{ К}$$

$$T_3 = \frac{P_3 \cdot v_3}{R_{\text{смеси}}} = \frac{31{,}45 \cdot 10^6 \cdot 0{,}018}{289{,}7} = 2000 \text{ К}$$

Для определения неизвестны остальных неизвестных параметров не-

обходимо определить коэффициент адиабаты. Для этого определим массовые теплоемкости смеси при температуре $T_2$ в точке 2.

$T_2$=1053-273=780$^0$C

$c_{pmN_2} = c_{pmN_2}|_0^{700} + \left(c_{pmN_2}|_0^{800} - c_{pmN_2}|_0^{700}\right) \cdot 0{,}8$ =*1,087+(1,097-1,087)·0,8=1,095*$\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$

$c_{pmCO} = c_{pmCO}|_0^{700} + \left(c_{pmCO}|_0^{800} - c_{pmCO}|_0^{700}\right) \cdot 0{,}8$ =*1,098+(1,109-1,098)·0,8=1,1068*$\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$

$c_{pmCO_2} = c_{pmCO_2}|_0^{700} + \left(c_{pmCO_2}|_0^{800} - c_{pmCO_2}|_0^{700}\right) \cdot 0{,}8$ =*1,064+(1,085-1,064)·0,8=1,0808*$\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$

$c_{pmH_2O} = c_{pmH_2O}|_0^{700} + \left(c_{pmH_2O}|_0^{800} - c_{pmH_2O}|_0^{700}\right) \cdot 0{,}8 =$ 2,042+*(2,076-2,042)·0,8=2,0692*$\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$

$c_{pm\text{смеси}}$=*0,097·1,095+0,439·1,1068+0,307·1,0808+0,157·2,0692=1,2486*$\frac{\text{Дж}}{\text{кг·К}}$

$c_{vmN_2} = c_{vmN_2}|_0^{700} + \left(c_{vmN_2}|_0^{800} - c_{vmN_2}|_0^{700}\right) \cdot 0{,}8$ =*0,79+(0,8-0,79)·0,8=0,798*$\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$

$c_{vmCO} = c_{vmCO}|_0^{700} + (c_{vmCO}|_0^{800} - c_{vmCO}|_0^{700}) \cdot 0{,}8$ =*0,801+(0,812-0,801)·0,8=0,8098*$\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$

$c_{vmCO_2} = c_{vmCO_2}|_0^{700} + \left(c_{vmCO_2}|_0^{800} - c_{vmCO_2}|_0^{700}\right) \cdot 0{,}8$ =*0,875+(0,896-0,875)·0,8=0,8918*$\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$

$c_{vmH_2O} = c_{vmH_2O}|_0^{700} + \left(c_{vmH_2O}|_0^{800} - c_{vmH_2O}|_0^{700}\right) \cdot 0{,}8 =$ 1,58+*(1,614-1,58)·0,8=1,6072*$\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$

$c_{vm\text{смеси}}$=*0,097·0,798+0,439·0,8098+0,307·0,8918+0,157·1,6072=0,95882*$\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$

Проверка: $c_{pm\text{смеси}} - c_{vm\text{смеси}} = R_{\text{смеси}}$

*1,2486 – 0,95882 = 0,2897* $\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$

Коэффициент адиабаты:

$$k = \frac{c_{pm\text{смеси}}}{c_{vm\text{смеси}}} = \frac{1{,}2486}{0{,}95882} = 1{,}30$$

Используя найденный коэффициент адиабаты, находится давление $P_1$.

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k$$

$$P_1 = \frac{P_2}{\left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k}$$

$P_1 = \frac{16,5}{\left(\frac{0,35}{0,018}\right)^{1,3}}$ =0,360 МПа

Из уравнения состояния газ находятся $T_1$.

$T_1 = \frac{P_1 \cdot v_1}{R_{\text{смеси}}} = \frac{0,36 \cdot 10^6 \cdot 0,35}{289,7} = 435$ К

Используя найденный коэффициент адиабаты k=1,3, находятся давление $P_5$.

$$\left(\frac{P_5}{P_4}\right) = \left(\frac{v_4}{v_5}\right)^k$$

$$P_5 = P_4 \cdot \left(\frac{v_4}{v_5}\right)^k$$

$P_5 = 31,45 \cdot \left(\frac{0,026}{0,35}\right)^{1,3}$ =1,06 МПа.

Из уравнения состояния газ находятся $T_5$.

$T_5 = \frac{P_5 \cdot v_5}{R_{\text{смеси}}} = \frac{1,06 \cdot 10^6 \cdot 0,35}{289,7} = 1280$ К

Таблица №7

Термодинамические параметры состояния в характерных точках цикла

| | Адиабатный процесс | Изохорный процесс | Изобарный процесс | Адиабатный процесс | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Точка 1 | Точка 2 | Точка 3 | Точка 4 | Точка 5 |
| $v$, м$^3$/кг | 0,35 | 0,018 | 0,018 | 0,026 | 0,35 |
| Р, МПа | 0,36 | 16,5 | 31,45 | 31,45 | 1,06 |
| Т, К | 435 | 1053 | 2000 | 2800 | 1280 |

3. Массовые теплоемкости цикла определяются для каждой точки кроме точки 2, так как массовые теплоемкости для этой точки найдены в п2.

Определим массовые теплоемкости смеси при температуре $T_1$ в точке 1.

$T_1$=435-273=162$^0$C

$c_{pmN_2} = c_{pmN_2}|_0^{100} + \left(c_{pmN_2}|_0^{100} - c_{pmN_2}|_0^{200}\right) \cdot 0,62$ =*1,04+(1,043-1,04)·0,62=1,0418*$\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$

$c_{pmCO} = c_{pmCO}|_0^{100} + \left(c_{pmCO}|_0^{200} - c_{pmCO}|_0^{100}\right) \cdot 0,62$ =*1,042+(1,046-1,042)·0,62=1,0444*$\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$

$c_{pmCO_2} = c_{pmCO_2}|_0^{100} + \left(c_{pmCO_2}|_0^{200} - c_{pmCO_2}|_0^{100}\right) \cdot$ $0,62$ =*0,866+(0,910-0,866)·0,62=0,8933*$\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$

$c_{pmH_2O} = c_{pmH_2O}|_0^{100} + \left(c_{pmH_2O}|_0^{200} - c_{pmH_2O}|_0^{100}\right) \cdot 0,62 =$

*1,873+(1,894-1,873)·0,62=1,886*$\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$

*cpm=0,097·1,0418+0,439·1,0444+0,307·0,8933+0,157·1,886=1,130кДж/кг·К*

$c_{vmN_2} = c_{vmN_2}|_0^{100} + \left(c_{vmN_2}|_0^{200} - c_{vmN_2}|_0^{0}\right) \cdot 0{,}62$ *=0,743+(0,746-0,743)·0,62=0,74486* $\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$

$c_{vmCO} = c_{vmCO}|_0^{100} + (c_{vmCO}|_0^{200} - c_{vmCO}|_0^{100}) \cdot 0{,}07$ *=0,745+(0,749-0,745)·0,62=0,74748* $\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$

$c_{vmCO_2} = c_{vmCO_2}|_0^{100} + \left(c_{vmCO_2}|_0^{200} - c_{vmCO_2}|_0^{100}\right) \cdot 0{,}07$ *=0,677+(0,721-0,677)·0,62=0,71428* $\frac{\text{Дж}}{\text{кг·К}}$

$c_{vmH_2O} = c_{vmH_2O}|_0^{100} + \left(c_{vmH_2O}|_0^{200} - c_{vmH_2O}|_0^{100}\right) \cdot 0{,}07 =$ 1,411*+(1,432-1,411)·0,62=1,42402* $\frac{\text{Дж}}{\text{кг·К}}$

$c_{vm\text{смеси}}$*=0,097·0,74486 +0,439·0, 7475+0,307·0, 7143+0,157·1,424=0,84018* $\frac{\text{Дж}}{\text{кг·К}}$

Проверка: $c_{pm\text{смеси}} - c_{vm\text{смеси}} = R_{\text{смеси}}$

$1{,}13 - 0{,}84018 \approx 0{,}2897$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$

Определим массовые теплоемкости смеси при температуре $T_3$ в точке 3.

$T_3$=2000-273=1727$^0$C

$c_{pmN_2} = c_{pmN_2}|_0^{1700} + \left(c_{pmN_2}|_0^{1800} - c_{pmN_2}|_0^{1700}\right) \cdot 0{,}27$ *=1,174+(1,180-1,174)·0,27=1,17562* $\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$

$c_{pmCO} = c_{pmCO}|_0^{1700} + \left(c_{pmCO}|_0^{1800} - c_{pmCO}|_0^{1700}\right) \cdot 0{,}27$ *=1,186+(1,192-1,186)·0,27=1,18762* $\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$

$c_{pmCO_2} = c_{pmCO_2}|_0^{1700} + \left(c_{pmCO_2}|_0^{1800} - c_{pmCO_2}|_0^{1700}\right) \cdot 0{,}27$ *=1,209+(1,218-1,209)·0,27=1,21143* $\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$

$c_{pmH_2O} = c_{pmH_2O}|_0^{1700} + \left(c_{pmH_2O}|_0^{1800} - c_{pmH_2O}|_0^{1700}\right) \cdot 0{,}27 =$ *2,363+(2,391-2,363)·0,27=2,37056* $\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$

$c_{pm\text{смеси}}$*=0,097·1,17562+0,439·1,18762+0,307·1,211143+0,157·2,37056 =1,3794*$\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$

$c_{vmN_2} = c_{vmN_2}|_0^{1700} + \left(c_{vmN_2}|_0^{1800} - c_{vmN_2}|_0^{1700}\right) \cdot 0{,}27$ *=0,877+(0,883-0,877)·0,27=0,87862* $\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$

$c_{vmCO} = c_{vmCO}|_0^{1700} + (c_{vmCO}|_0^{1800} - c_{vmCO}|_0^{1700}) \cdot 0{,}27$ *=0,889+(0,895-0,889)·0,27=0,89062* $\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$

$c_{vmCO_2} = c_{vmCO_2}|_0^{1700} + \left(c_{vmCO_2}|_0^{1800} - c_{vmCO_2}|_0^{1700}\right) \cdot 0{,}27$ *=1,020+(1,029-1,020)·0,27=1,02243* $\frac{\text{Дж}}{\text{кг·К}}$

$c_{vmH_2O} = c_{vmH_2O}|_0^{1700} + \left(c_{vmH_2O}|_0^{1800} - c_{vmH_2O}|_0^{1700}\right) \cdot 0{,}27 =$ 1,901+*(1,929-1,901)·0,27=1,90856*$\frac{\text{Дж}}{\text{кг·К}}$

$c_{vm\text{смеси}}$*=0,097·0, 87862 +0,439·0,8906+0,307·1,02243+0,157·1,909=1,08973*$\frac{\text{Дж}}{\text{кг·К}}$

Проверка: $c_{pm\text{смеси}} - c_{vm\text{смеси}} = R_{\text{смеси}}$

*1,3794– 1,08973≈ 0,2897* $\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$

Определим массовые теплоемкости смеси при температуре $T_4$ в точке 4.

$T_4$=2800-273=2527$^0$C

$c_{pmN_2} = c_{pmN_2}|_0^{2500} + \left(c_{pmN_2}|_0^{2600} - c_{pmN_2}|_0^{2500}\right) \cdot$ 0,27 =*1,214+(1,220-1,214)·0,27=1,2156*$\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$

$c_{pmCO} = c_{pmCO}|_0^{2500} + \left(c_{pmCO}|_0^{2600} - c_{pmCO}|_0^{2500}\right) \cdot$ 0,27 =*1,126+(1,233-1,126)·0,27=1,15489* $\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$

$c_{pmCO_2} = c_{pmCO_2}|_0^{2500} + \left(c_{pmCO_2}|_0^{2600} - c_{pmCO_2}|_0^{2500}\right) \cdot$ 0,27 =*1,264+(1,272-1,264)·0,27=1,2662*$\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$

$c_{pmH_2O} = c_{pmH_2O}|_0^{2500} + \left(c_{pmH_2O}|_0^{2600} - c_{pmH_2O}|_0^{2500}\right) \cdot 0{,}27 =$ 2,555+*(2,575-2,555)·0,27=2,5604*$\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$

$c_{pm\text{смеси}}$*=0,097·1,2156+0,439·1,20411+0,307·1,2662+0,157·2,5604=1,4156*$\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$

$c_{vmN_2} = c_{vmN_2}|_0^{2500} + \left(c_{vmN_2}|_0^{2600} - c_{vmN_2}|_0^{2500}\right) \cdot 0{,}27$ =*0,917+(0,923-0,917)·0,27=0,91862*$\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$

$c_{vmCO} = c_{vmCO}|_0^{2500} + \left(c_{vmCO}|_0^{2600} - c_{vmCO}|_0^{2500}\right) \cdot$ 0,27 =*0,929+(0,936-0,929)·0,27=0,93089*$\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$

$c_{vmCO_2} = c_{vmCO_2}|_0^{2500} + \left(c_{vmCO_2}|_0^{2600} - c_{vmCO_2}|_0^{2500}\right) \cdot$ 0,27 =*1,075+(1,083-1,075)·0,27=1,07716* $\frac{\text{Дж}}{\text{кг·К}}$

$c_{vmH_2O} = c_{vmH_2O}|_0^{2500} + \left(c_{vmH_2O}|_0^{2600} - c_{vmH_2O}|_0^{2500}\right) \cdot 0{,}27 =$ 2,075+*(2,113-2,075)·0,27=2,08526* $\frac{\text{Дж}}{\text{кг·К}}$

$c_{vm\text{смеси}}$*=0,097·0,91862+0,439·0,93089+0,307·1,077+0,157·2,08526=1,1558*$\frac{\text{Дж}}{\text{кг·К}}$

Проверка: $c_{pm\text{смеси}} - c_{vm\text{смеси}} = R_{\text{смеси}}$

*1,4153 – 1,1587 ≈ 0,2897* $\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$

Определим массовые теплоемкости смеси при температуре $T_5$ в точке 5.

$T_4$=1280-273=1007$^0$C

$c_{pmN_2} = c_{pmN_2}|_0^{1000} + \left(c_{pmN_2}|_0^{1100} - c_{pmN_2}|_0^{1000}\right) \cdot$ 0,07 =*1,118+(1,127-1,118)·0,07=1,11863*$\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$

$c_{pmCO} = c_{pmCO}|_0^{1000} + \left(c_{pmCO}|_0^{1100} - c_{pmCO}|_0^{1000}\right) \cdot 0{,}07$ =*1,13+(1,14-1,13)·0,07=1,1307* $\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$

$c_{pmCO_2} = c_{pmCO_2}|_0^{1000} + \left(c_{pmCO_2}|_0^{1100} - c_{pmCO_2}|_0^{1000}\right) \cdot$ 0,07 =*1,122+(1,138-1,122)·0,07=1,12312* $\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$

$c_{pmH_2O} = c_{pmH_2O}|_0^{1000} + \left(c_{pmH_2O}|_0^{1100} - c_{pmH_2O}|_0^{1000}\right) \cdot 0{,}07 =$ 2,*144+(2,177-2,144)·0,07=2,14631*$\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$

$c_{pm\text{смеси}}$=*0,097·1,11863+0,439·1,1307+0,307·1,12312+0,157·2,144=1,285652* $\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$

$c_{vmN_2} = c_{vmN_2}|_0^{1000} + \left(c_{vmN_2}|_0^{1100} - c_{vmN_2}|_0^{1000}\right) \cdot 0{,}07$ =*0,821+(0,830-0,821)·0,07=0,82163* $\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$

$c_{vmCO} = c_{vmCO}|_0^{1000} + (c_{vmCO}|_0^{1100} - c_{vmCO}|_0^{1000}) \cdot$ 0,07 =*0,833+(0,843-0,833)·0,07=0,8337* $\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$

$c_{vmCO_2} = c_{vmCO_2}|_0^{1000} + \left(c_{vmCO_2}|_0^{1100} - c_{vmCO_2}|_0^{1000}\right) \cdot$ 0,07 =*0,933+(0,933-0,949)·0,07=0,93412* $\frac{\text{Дж}}{\text{кг·К}}$

$c_{vmH_2O} = c_{vmH_2O}|_0^{1000} + \left(c_{vmH_2O}|_0^{1100} - c_{vmH_2O}|_0^{1000}\right) \cdot 0{,}07 =$ 1,682*+(1,715-1,682)·0,07=1,68431* $\frac{\text{Дж}}{\text{кг·К}}$

$c_{vm\text{смеси}}$=*0,097·0,82163 +0,439·0,8337 +0,307·0,93412 +0,157·1,68431 =0,996904*$\frac{\text{Дж}}{\text{кг·К}}$

Проверка: $c_{pm\text{смеси}} - c_{vm\text{смеси}} = R_{\text{смеси}}$

*1,285652 – 0,996904≈ 0,288748* $\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$≈289,7 $\frac{\text{Дж}}{\text{кг·К}}$

4. Определим массовые теплоемкости для процессов:

Процесс 1-2

$c_{pm}|_{162}^{780}$=$\frac{c_{pm}|_0^{780}\cdot 780 - c_{pm}|_0^{162}\cdot 162}{780-162} = \frac{1{,}2486\cdot 780 - 1{,}13\cdot 162}{780-162} = 1{,}27968\,\frac{\text{Дж}}{\text{кг·К}}$

$c_{vm}|_{162}^{780}$=$\frac{c_{vm}|_0^{780}\cdot 780 - c_{vm}|_0^{162}\cdot 162}{780-162} = \frac{0.95882\cdot 780 - 0{,}84018\cdot 162}{780-162} = 0{,}98992\,\frac{\text{Дж}}{\text{кг·К}}$

Проверка: $c_{pm\text{смеси}} - c_{vm\text{смеси}} = R_{\text{смеси}}$

*1,27968 – 0,98992 ≈ 0,2897* $\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$

Процесс 2-3

$c_{pm}|_{780}^{1727}$=$\frac{c_{pm}|_0^{1727}\cdot 1727 - c_{pm}|_0^{780}\cdot 780}{1727-780} = \frac{1{,}3794\cdot 1727 - 1{,}2486\cdot 780}{1727-780} =$ 1,487134 $\frac{\text{Дж}}{\text{кг·К}}$

$c_{vm}|_{780}^{1727}$=$\frac{c_{vm}|_0^{1727}\cdot 1727 - c_{vm}|_0^{780}\cdot 780}{1727-780} = \frac{1{,}08973\cdot 1727 - 0.95882\cdot 780}{1727-780} =$

$1{,}197554\,\frac{\text{Дж}}{\text{кг·К}}$

Проверка: $$c_{pm\text{смеси}} - c_{vm\text{смеси}} = R_{\text{смеси}}$$

$$1{,}487134 - 1.197554 \approx 0{,}2896\,\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$$

Процесс 3-4

$$c_{pm}|_{1727}^{2527} = \frac{c_{pm}|_0^{2527}\cdot 2527 - c_{pm}|_0^{1727}\cdot 1727}{2527-1727} = \frac{1{,}4156\cdot 2527 - 1{,}3794\cdot 1727}{2527-1727} =$$

$1{,}4937\,\frac{\text{Дж}}{\text{кг·К}}$

$$c_{vm}|_{1727}^{2527} = \frac{c_{vm}|_0^{2527}\cdot 2527 - c_{vm}|_0^{1727}\cdot 1727}{2527-1727} = \frac{1{,}1558\cdot 2527 - 1{,}08973\cdot 1727}{2527-1727} =$$

$1{,}2984\,\frac{\text{Дж}}{\text{кг·К}}$

Проверка: $$c_{pm\text{смеси}} - c_{vm\text{смеси}} = R_{\text{смеси}}$$

$$1{,}562007 - 1{,}2984 \approx 0{,}2896\,\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$$

Процесс 4-5

$$c_{pm}|_{2527}^{1007} = \frac{c_{pm}|_0^{1007}\cdot 1007 - c_{pm}|_0^{2527}\cdot 2527}{1007-2527} = \frac{1{,}285652\cdot 1007 - 1{,}4156\cdot 2527}{1007-2527} =$$

$1{,}5017\,\frac{\text{Дж}}{\text{кг·К}}$

$$c_{vm}|_{780}^{1727} = \frac{c_{vm}|_0^{1007}\cdot 1007 - c_{vm}|_0^{2527}\cdot 2527}{1007-2527} = \frac{0{,}996904\cdot 1007 - 1{,}1558\cdot 2527}{1007-2527} =$$

$1{,}26107\,\frac{\text{Дж}}{\text{кг·К}}$

Проверка: $$c_{pm\text{смеси}} - c_{vm\text{смеси}} = R_{\text{смеси}}$$

$$1{,}5376 - 1{,}26107 \approx 0{,}2896\,\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$$

Процесс 5-1

$$c_{pm}|_{1007}^{162} = \frac{c_{pm}|_0^{162}\cdot 162 - c_{pm}|_0^{1007}\cdot 1007}{162-1007} = \frac{1{,}13\cdot 1007 - 1{,}285652\cdot 1007}{162-1007} = 1{,}3154\,\frac{\text{Дж}}{\text{кг·К}}$$

$$c_{vm}|_{1007}^{162} = \frac{c_{vm}|_0^{162}\cdot 162 - c_{vm}|_0^{1007}\cdot 1007}{162-1007} = \frac{0{,}84018\cdot 162 - 0{,}996904\cdot 1007}{162-1007} = 1{,}027\,\frac{\text{Дж}}{\text{кг·К}}$$

Проверка: $$c_{pm\text{смеси}} - c_{vm\text{смеси}} = R_{\text{смеси}}$$

$$1{,}5376 - 1{,}26107 \approx 0{,}2884\,\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$$

Таблица №8

| Процесс | Температура | $c_{pm\text{смеси}}$ | $c_{vm\text{смеси}}$ |
|---|---|---|---|
| 1 – 2 | 162 – 780 | 1,27968 | 0,98992 |
| 2 – 3 | 780 – 1727 | 1,48713 | 1,19755 |
| 3 – 4 | 1727 – 2527 | 1,4937 | 1,29840 |
| 4 – 5 | 2527 – 1007 | 1,5017 | 1,26107 |
| 5 – 1 | 1007 – 162 | 1,31540 | 1,02700 |

5. Определим изменение функций состояния ***Δu***, ***Δh***, ***Δs***, термодинамическую работу ***l*** и теплообмен ***q***.

**Процесс 1-2** – адиабатное сжатие

Изменение внутренней энергии:

$\boldsymbol{\Delta u_{1-2}} = c_{vmсмеси}(t_2 - t_1)$= 0,98992·(780 – 162)=611,770 кДж/кг

Изменение энтальпии:

$\boldsymbol{\Delta h_{1-2}} = c_{pmсмеси}(t_2 - t_1)$= 1,27968·(780 – 162)=790,848 кДж/кг

Изменение энтропии:

$\boldsymbol{\Delta s_{1-2}}$ = 0, так как процесс адиабатный.

Термодинамическая работа:

$\boldsymbol{l_{1-2}} = -\Delta u_{1-2}$= - 611,77 кДж/кг

или

$\boldsymbol{l_{1-2}} = \frac{1}{k-1}(p_1 v_1 - p_2 v_2)$=$\frac{1}{1,3-1}(0,36 \cdot 10^6 \cdot 0,35 - 16,5 \cdot 10^6 \cdot 0,018)$=607,12 кДж/кг

Адиабатный процесс происходит без теплообмена, поэтому **q=0**.

**Процесс 2-3** – изохорный подвод тепла.

Изменение внутренней энергии:

$\boldsymbol{\Delta u_{2-3}} = c_{vm_{смеси}}(t_3 - t_2)$= 1,19755·(1727 – 780)=1134,08 кДж/кг

Изменение энтальпии:

$\boldsymbol{\Delta h_{2-3}} = c_{pm_{смеси}}(t_3 - t_2)$= 1,48713·(1727 – 780)=1408,32 кДж/кг

Изменение энтропии:

$\boldsymbol{\Delta s_{2-3}} = c_{vm_{смеси}} \cdot ln\frac{T_3}{T_2} = 1,19755 \cdot \ln\frac{2000}{1053}$ =0,7682 кДж/кг

Термодинамическая работа в данном процессе не совершается:

$\boldsymbol{l_{2-3}} = 0$.

Подводимое тепло равно изменению внутренней энергии

$\boldsymbol{q} = \boldsymbol{\Delta u_{2-3}}$=1134,08 кДж/кг

**Процесс 3-4** – изобарный подвод тепла

Изменение внутренней энергии:

$\boldsymbol{\Delta u_{3-4}} = c_{vm_{смеси}}(t_4 - t_3)$= 1,2984·(2527 – 1727)=1038,74 кДж/кг

Изменение энтальпии:

$\boldsymbol{\Delta h_{3-4}} = c_{pm_{смеси}}(t_4 - t_3)$= 1,4937·(2527 – 1727)=1194,997 кДж/кг

Изменение энтропии:

$\boldsymbol{\Delta s_{3-4}} = c_{vm_{смеси}} \cdot ln\frac{T_4}{T_3} = 1,2984 \cdot \ln\frac{2800}{2000}$ =0,43689 кДж/кг

Термодинамическая работа:

$\boldsymbol{l_{3-4}} = P_3(v_4 - v_3) = 31,45 \cdot 10^6 \cdot (0,026 - 0,018)$=251,6 кДж/кг.

Подводимое тепло:

$\boldsymbol{q} = c_{pm_{смеси}}(t_4 - t_3)$ =1,56201·(2527 – 1727)=1249,61 кДж/кг

или

$\boldsymbol{q} = \boldsymbol{\Delta u_{3-4}} + \boldsymbol{l}$ =1038,74 +251,6 =1290,34 кДж/кг

**Процесс 4-5**– адиабатное расширение

Изменение внутренней энергии:

$\boldsymbol{\Delta u_{4-5}} = c_{vm_{смеси}}(t_5 - t_4)$= 1,26107·(1007 – 2527)= - 1916,82 кДж/кг

Изменение энтальпии:

$\boldsymbol{\Delta h_{3-4}} = c_{pm_{смеси}}(t_4 - t_3)$= 1,5017·(1007 – 2527)= - 2282,61 кДж/кг

Изменение энтропии:

$\boldsymbol{\Delta s_{4-5}}$ = 0, так как процесс адиабатный.

Термодинамическая работа:

$\boldsymbol{l_{4-5}} = -\Delta u_{4-5}$=1916,82 кДж/кг

Адиабатный процесс происходит без теплообмена, поэтому **q=0**.

**Процесс 5-1** – изохорный отвод тепла

Изменение внутренней энергии:

$\boldsymbol{\Delta u_{5-1}} = c_{vm_{смеси}}(t_1 - t_5)$= 1,027·(162 – 1007)= - 867,77 кДж/кг

Изменение энтальпии:

$\boldsymbol{\Delta h_{5-1}} = c_{pm_{смеси}}(t_1 - t_5)$= 1,3154·(162 – 1007)= - 1111,6 кДж/кг

Изменение энтропии:

$\boldsymbol{\Delta s_{5-1}} = c_{vm_{смеси}} \cdot ln\frac{T_5}{T_1} = 1{,}027 \cdot \ln\frac{162}{1007}$ = - 1,876 кДж/кг

Термодинамическая работа в данном процессе не совершается:

$\boldsymbol{l_{5-1}} = 0$.

Отводимое тепло равно изменению внутренней энергии

$\boldsymbol{q} = \boldsymbol{\Delta u_{5-1}}$= - 867,77 кДж/кг

Таблица №9

Изменение функций процесса и состояния в процессах цикла

| Процесс | Δu | Δh | l | q | Δs |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 – 2 | 611,770 | 790,848 | - 611,77 | 0 | 0 |
| 2 – 3 | 1134,08 | 1408,32 | 0 | 1134,08 | 0,7682 |
| 3 – 4 | 1038,74 | 1194,99 | 251,6 | 1249,61 | 0,43689 |
| 4 – 5 | - 1916,82 | - 2282,61 | 1916,82 | 0 | 0 |
| 5 – 1 | - 867,77 | - 1111,6 | 0 | - 867,77 | - 1,10835 |
| Сумма | 0 | -0,052 | 1556,7 | 1515,9 | 0,097 |

Работа цикла: $l_ц$=1556,7 кДж/кг

Подведенное тепло: $q_1$=1134,08 + 1249,61 = 2383,69 кДж/кг

Отведенное тепло: $q_2$=- 867,77 кДж/кг

КПД цикла: $\eta_ц = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{867{,}77}{2383{,}69} = 0{,}6359$ или 63,59%/

6. Цикл поршневого ДВС изобразим в PV и TS координатах с промежуточными точками.

а) Расчет промежуточных точек для построения цикла в PV координатах.

Найдем координату V для промежуточной точки $P_{1.1}$=8МПа ($P_1 < P_{1.1} < P_2$), по уравнению адиабаты:

$$\left(\frac{P_{1.1}}{P_1}\right) = \left(\frac{v_1}{v_{1.1}}\right)^k$$

$$\left(\frac{P_{1.1}}{P_1}\right)^{1/k} = \left(\frac{v_1}{v_{1.1}}\right)$$

$$v_{1.1} = \frac{v_1}{\left(\frac{P_{1.1}}{P_1}\right)^{1/k}}$$

$v_{1.1} = \frac{0{,}35}{\left(\frac{8}{0{,}36}\right)^{1/1{,}3}}$=*0,32* м$^3$/кг.

Точка 1.1 с координатами $v_{1.1}$=*0,32* м$^3$/кг $P_{1.1}$=8МПа

Найдем координату V для промежуточной точки $P_{4.1}$=14МПа ($P_4$< $P_{4.1}$< $P_5$), по уравнению адиабаты:

$$\left(\frac{P_{4.1}}{P_4}\right) = \left(\frac{v_4}{v_{4.1}}\right)^k$$

$$\left(\frac{P_{4.1}}{P_4}\right)^{1/k} = \frac{v_4}{v_{4.1}}$$

$$v_{4.1} = \frac{v_4}{\left(\frac{P_{4.1}}{P_4}\right)^{1/k}}$$

$v_{4.1} = \frac{0{,}026}{\left(\frac{14}{31{,}45}\right)^{1/1{,}3}}$=*0,04845* м$^3$/кг.

Точка 4.1 с координатами $v_{4.1}$=*0, 04845* м$^3$/кг $P_{4.1}$=14МПа

б) Расчет промежуточных точек для построения цикла в TS координатах.

Найдем координату S для промежуточной точки $T_{2.1}$=1500 K ($T_2$< $T_{2.1}$< $T_3$), изменение энтропии для изохорного процесса:

$$\Delta s_{2-2.1} = c_{\upsilon m_{\text{смеси}}} \cdot \ln\frac{T_{2.1}}{T_2} = 1{,}19755 \cdot \ln\frac{1500}{1053} = 0{,}4237 \text{ кДж/кг}$$

Найдем координату S для промежуточной точки $T_{3.1}$=2400 K ($T_3$< $T_{3.1}$< $T_4$), изменение энтропии для изохорного процесса:

$$\Delta s_{3-3.1} = c_{\upsilon m_{\text{смеси}}} \cdot \ln\frac{T_{3.1}}{T_3} = 1{,}2984 \cdot \ln\frac{2400}{2000} = 0{,}2367 \text{ кДж/кг}$$

Найдем координату S для промежуточной точки $T_{5.1}$=700 K ($T_5$< $T_{5.1}$< $T_1$), изменение энтропии для изохорного процесса:

$$\Delta s_{5-5.1} = c_{\upsilon m_{\text{смеси}}} \cdot \ln\frac{T_{5.1}}{T_5} = 1{,}0269 \cdot \ln\frac{700}{1280} = -\ 0{,}6198 \text{ кДж/кг}$$

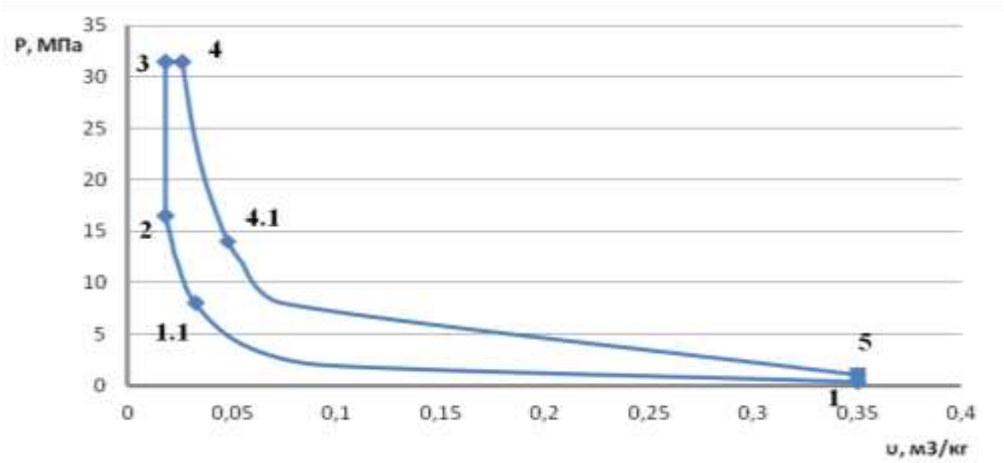



Рисунок 2. Термодинамический цикл поршневого ДВС со смешанным подводом тепла в PV координатах

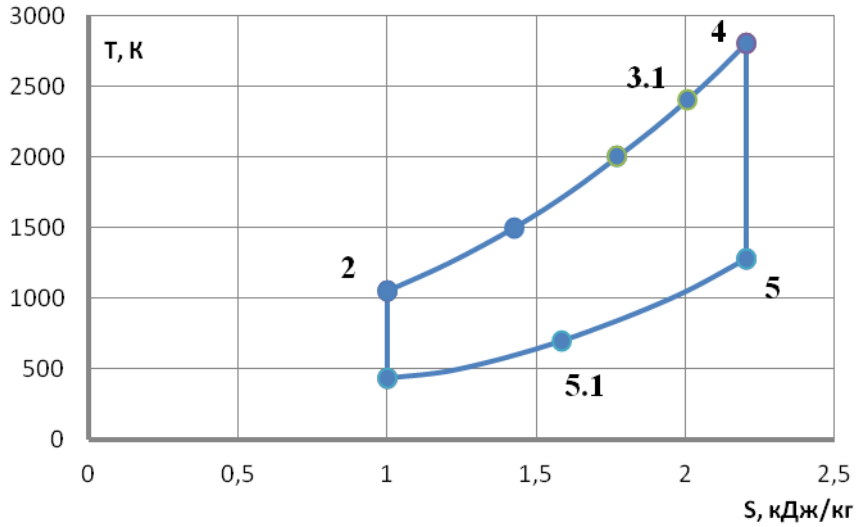



Рисунок 3. Термодинамический цикл поршневого ДВС со смешанным подводом тепла в TS координатах

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. «Техническая термодинамика» - М.: Издательский дом МЭИ, 2008. - 496 с.

2. Техническая термодинамика (под ред. д.т.н.,проф.,Крутова В.И.).- М.: Высшая школа, 1981.-439 с.

3. Иванов И.А., Крамской В.Ф., Моисеев Б.В., Степанов О.А. Теплоэнергетика при эксплуатации транспортных средств в нефтегазодобывающих районах Западной Сибири. - М.: Недра, 1997.- 269 с.

4. Сборник задач по технической термодинамике и теплопередаче (под ред. Юдаева Н.Б.).- М.: Высшая школа. 1968.- 372 с.

5. Рабинович О.М. Сбооник задач по технической теомодинамике. М.. 1969. кс.-М.: Энергия. 1971. 352 с.

7. Андрианова Т.Н., Дзампов Б.В., Зубарев В.I 1., Ремизов С'.А. «Сборник задач по технической термодинамике».- М.Энергоиздат, 1981 .- 240 с.

8. Теплотехника (под ред. д.т.н.,проф., Луканина В.Н.).- М.: Высшая школа. 1999.-671 с.

**Приложение 1**

Средняя массовая теплоемкость рабочих тел при постоянном объеме $C_{pm}$ в диапазоне температур от $0^0$C до $t^0$C, кДж/(кг·К)

| t | $O_2$ | $N_2$ | CO | $CO_2$ | $H_2O$ | Воздух | $H_2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0,915 | 1,039 | 1,040 | 0,815 | 1,860 | 1,003 | 14,195 |
| 100 | 0,923 | 1,040 | 1,042 | 0,866 | 1,873 | 1,006 | 14,353 |
| 200 | 0,935 | 1,043 | 1,046 | 0,910 | 1,894 | 1,011 | 14,421 |
| 300 | 0,950 | 1,049 | 1,054 | 0,949 | 1,919 | 1,019 | 14,446 |
| 400 | 0,965 | 1,057 | 1,063 | 0,983 | 1,948 | 1,028 | 14,477 |
| 500 | 0,979 | 1,066 | 1,075 | 1,013 | 1,978 | 1,039 | 14,509 |
| 600 | 0,993 | 1,076 | 1,086 | 1,040 | 2,009 | 1,049 | 14,542 |
| 700 | 1,005 | 1,087 | 1,098 | 1,064 | 2,042 | 1,060 | 14,587 |
| 800 | 1,016 | 1,097 | 1,109 | 1,085 | 2,076 | 1,071 | 14,641 |
| 900 | 1,026 | 1,108 | 1,120 | 1,105 | 2,110 | 1,081 | 14,706 |
| 1000 | 1,035 | 1,118 | 1,130 | 1,122 | 2,144 | 1,091 | 14,776 |
| 1100 | 1,043 | 1,127 | 1,140 | 1,138 | 2,177 | 1,100 | 14,853 |
| 1200 | 1,051 | 1,136 | 1,149 | 1,153 | 2,211 | 1,108 | 14,934 |
| 1300 | 1,058 | 1,145 | 1,158 | 1,166 | 2,243 | 1,116 | 15,023 |
| 1400 | 1,065 | 1,153 | 1,166 | 1,178 | 2,275 | 1,124 | 15,113 |
| 1500 | 1,071 | 1,160 | 1,173 | 1,190 | 2,305 | 1,131 | 15,202 |
| 1600 | 1,077 | 1,167 | 1,180 | 1,200 | 2,335 | 1,133 | 15,294 |
| 1700 | 1,083 | 1,174 | 1,186 | 1,209 | 2,363 | 1,144 | 15,383 |
| 1800 | 1,089 | 1,180 | 1,192 | 1,218 | 2,391 | 1,150 | 15,472 |
| 1900 | 1,094 | 1,186 | 1,198 | 1,226 | 2,417 | 1,156 | 15,561 |
| 2000 | 1,099 | 1,191 | 1,203 | 1,233 | 2,442 | 1,161 | 15,649 |
| 2100 | 1,104 | 1,197 | 1,208 | 1,241 | 2,467 | 1,166 | 15,736 |
| 2200 | 1,109 | 1,202 | 1,213 | 1,247 | 2,490 | 1,171 | 15,819 |
| 2300 | 1,114 | 1,206 | 1,218 | 1,253 | 2,512 | 1,176 | 15,902 |
| 2400 | 1,118 | 1,210 | 1,222 | 1,259 | 2,334 | 1,180 | 15,983 |
| 2500 | 1,123 | 1,214 | 1,126 | 1,264 | 2,555 | 1,184 | 16,064 |
| 2600 | 1,127 | 1,220 | 1,233 | 1,272 | 2,575 | 1,188 | 16,141 |
| 2700 | 1,132 | 1,225 | 1,238 | 1,277 | 2,594 | 1,192 | 16,215 |
| 2800 | 1,137 | 1,230 | 1,243 | 1,283 | 2,616 | 1,197 | 16,291 |
| 2900 | 1,142 | 1,2.35 | 1,248 | 1,288 | 2,630 | 1,201 | 16,360 |
| 3000 | 1,147 | 1,240 | 1,253 | 1,294 | 2,647 | 1,206 | 16,441 |

**Приложение 2**

Средняя массовая теплоемкость рабочих тел при постоянном объеме $C_{vm}$ в диапазоне температур от $0^0$C до $t^0$C, кДж/(кг·К)

| t | $O_2$ | $N_2$ | CO | $CO_2$ | $H_2O$ | Воздух | $H_2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0,655 | 0,742 | 0,743 | 0,626 | 1,398 | 0,716 | 10,071 |
| 100 | 0,663 | 0,743 | 0,745 | 0,677 | 1,411 | 0,719 | 10,228 |
| 200 | 0,675 | 0,746 | 0,749 | 0,721 | 1,432 | 0,724 | 10,297 |
| 300 | 0,690 | 0,752 | 0,757 | 0,760 | 1,457 | 0,732 | 10,322 |
| 400 | 0,705 | 0,760 | 0,766 | 0,794 | 1,486 | 0,741 | 10,353 |
| 500 | 0,719 | 0,769 | 0,778 | 0,824 | 1,516 | 0,752 | 10,384 |
| 600 | 0,733 | 0,779 | 0,789 | 0,851 | 1,547 | 0,762 | 10,417 |
| 700 | 0,745 | 0,790 | 0,801 | 0,875 | 1,580 | 0,773 | 10,463 |
| 800 | 0,756 | 0,800 | 0,812 | 0,896 | 1,614 | 0,784 | 10,517 |
| 900 | 0,766 | 0,811 | 0,823 | 0,916 | 1,648 | 0,794 | 10,581 |
| 1000 | 0,775 | 0,821 | 0,833 | 0,933 | 1,682 | 0,804 | 10,652 |
| 1100 | 0,783 | 0,830 | 0,843 | 0,949 | 1,715 | 0,813 | 10,727 |
| 1200 | 0,791 | 0,839 | 0,852 | 0,964 | 1,749 | 0,821 | 10,809 |
| 1300 | 0,798 | 0,848 | 0,861 | 0,977 | 1,781 | 0,829 | 10,899 |
| 1400 | 0,805 | 0,856 | 0,869 | 0,989 | 1,813 | 0,837 | 10,988 |
| 1500 | 0,811 | 0,863 | 0,876 | 1,001 | 1,843 | 0,844 | 11,077 |
| 1600 | 0,817 | 0,870 | 0,883 | 1,011 | 1,873 | 0,851 | 11,169 |
| 1700 | 0,823 | 0,877 | 0,889 | 1,020 | 1,901 | 0,857 | 11,258 |
| 1800 | 0,829 | 0,883 | 0,895 | 1,029 | 1,929 | 0,863 | 11,347 |
| 1900 | 0,834 | 0,889 | 0,901 | 1,037 | 1,955 | 0,869 | 11,437 |
| 2000 | 0,839 | 0,894 | 0,906 | 1,044 | 1,980 | 0,874 | 11,524 |
| 2100 | 0,844 | 0,900 | 0,911 | 1,052 | 2,005 | 0,879 | 11,611 |
| 2200 | 0,849 | 0,905 | 0,916 | 1,058 | 2,028 | 0,884 | 11,694 |
| 2300 | 0,854 | 0,909 | 0,921 | 1,064 | 2,050 | 0,889 | 11,798 |
| 2400 | 0,858 | 0,913 | 0,925 | 1,070 | 2,072 | 0,893 | 11,858 |
| 2500 | 0,863 | 0,917 | 0,929 | 1,075 | 2,075 | 0,897 | 11,937 |
| 2600 | 0,867 | 0,923 | 0,936 | 1,083 | 2,113 | 0,901 | 12,016 |
| 2700 | 0,872 | 0,928 | 0,941 | 1,088 | 2,132 | 0,905 | 12,091 |
| 2800 | 0,877 | 0,933 | 0,946 | 1,094 | 2,150 | 0,910 | 12,129 |
| 2900 | 0,882 | 0,938 | 0,951 | 1,099 | 2,168 | 0,914 | 12,181 |
| 3000 | 0,887 | 0,943 | 0,956 | 1,105 | 2,185 | 0,919 | 12,236 |

Учебное издание

**РАСЧЕТ ЦИКЛА ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

Методические рекомендации
к выполнению расчетно-графической работы

Составители
АНТОНОВА Е. О.
РЫДАЛИНА Н. В.

*В авторской редакции*

Подписано в печать 18.04.2016. Формат 60x90 1/16. Печ. л. 2.
Тираж 50 экз. Заказ № 16-489.

Библиотечно-издательский комплекс
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Тюменский индустриальный университет».
625000, Тюмень, ул. Володарского, 38.

Типография библиотечно-издательского комплекса.
625039, Тюмень, ул. Киевская, 52.