

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕ-
РАЦИИ

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 отвечать 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 $c_{pm_{смеси}}$ и $c_{vm_{смеси}}$, для каждого процесса;
- определение для каждого процесса, входящего в цикл, функций состояния; изменения внутренней энергии Δu , изменения энтальпии Δh , изменения энтропии Δs 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, м³/кг; T - абсолютная температура, К; R - характеристическая газовая постоянная, Дж/(кг. К),

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

где $\bar{R}$ - универсальная газовая постоянная, 8314 Дж/(кмоль. К), μ - 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:

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

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

Тогда газовая постоянная смеси газов:

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

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 истинной теплоемкостью $C_{pm}^{см}$ и $C_{vm}^{см}$.

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

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

Для вычисления средних теплоёмкостей в диапазоне температур от t_1

до t_2 пользуются формулой:

$$C_m|_{t_1}^{t_2} = \frac{C_m|_0^{t_2} t_2 - C_m|_1^{t_1} t_1}{t_2 - t_1} \quad (5)$$

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

Средняя массовая теплоёмкость смеси определяется:

$$C_m^{cm} = \sum m_i C_{mi} \quad (6)$$

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

Показатель адиабаты

Идеальных газов

$$k = C_{pm} / C_{vm} \quad (7)$$

Значения молекулярных масс и характеристических газовых постоянных (μ_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:

$$q_{1-2} = \Delta u + l_{1-2} \quad (8)$$

$$q_{1-2} = \Delta h + w_{1-2} \quad (9)$$

Количества тепла q_{1-2} термодинамическая работа $l_{1-2} = \int_1^2 P dV$ потенциальная

работа $w_{1-2} = \int_{P_1}^{P_2} V dP$ 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:

$$\Delta U = C_{vm} (t_2 - t_1) \quad (10)$$

$$\Delta h = C_{pm} (t_2 - t_1) \quad (11)$$

Термодинамические процессы

Основными процессами, которые изучаются в термодинамике, являются изохорным ($V = \text{idem}$), изометрический ($T = \text{idem}$) и адиабатный ($PV^k = \text{idem}$). 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 $PV^n = \text{idem}$, где n - показатель политропы, который может принимать любые значения от $-\infty$ до $+\infty$.

Второе начало термодинамики

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

$$dS = \frac{\delta q}{T} \quad (12)$$

$$\delta q = TdS \quad (13)$$

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 тела возвращается в исходное состояние. Степень совершенства работы цикла характеризуется термическим КПД:

$$\eta_t = \frac{l_u}{q_1} = \frac{q_1 - |q_2|}{q_1} = 1 - \frac{|q_2|}{q_1} \quad (14)$$

Первое начало термодинамики для цикла имеет вид:

$$\oint \delta q = \oint dU + \oint \delta l = \oint dh + \oint \delta W \quad (15)$$

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

Следовательно, выражение (15) примет вид:

$$l_u = \oint \delta q = \oint \delta l = \oint \delta W \quad (16)$$

$$l_u = \sum q_i = \sum l_i = \sum W_i \quad (17)$$

где l_u - работа цикла, Дж/кг; q_i - количество подведённой (отведённой) теплоты; l_i - термодинамическая работа; W_i - потенциальная работа; ΔU_i - изменение внутренней энергии; Δh_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	$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^n$ $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{n-1}$ $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}$	$P_1 = P_2$ $\frac{T_2}{T_1} = \frac{V_2}{V_1}$	$V_1 = V_2$ $\frac{T_2}{T_1} = \frac{P_2}{P_1}$	$T_1 = T_2$ $\frac{P_2}{P_1} = \frac{V_1}{V_2}$	$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1}$ $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$
Термодинамическая работа	$l_{1-2} = \frac{P_1V_1 - P_2V_2}{n-1}$ $l_{1-2} = \frac{R(T_1 - T_2)}{n-1}$	$l_{1-2} = R(T_2 - T_1)$ $l_{1-2} = P(V_2 - V_1)$	$l_{1-2} = 0$	$l_{1-2} = RT \ln \frac{V_2}{V_1}$ $l_{1-2} = RT \ln \frac{P_1}{P_2}$	$l_{1-2} = \frac{P_1V_1 - P_2V_2}{k-1}$ $l_{1-2} = \frac{R(T_1 - T_2)}{k-1}$
Потенциальная работа	$W_{1-2} = \frac{n(P_1V_1 - P_2V_2)}{n-1}$ $W_{1-2} = \frac{nR(T_1 - T_2)}{n-1}$	$W_{1-2} = 0$	$W_{1-2} = V(P_1 - P_2)$ $W_{1-2} = R(T_2 - T_1)$	$W_{1-2} = l_{1-2}$	$W_{1-2} = \frac{k(P_1V_1 - P_2V_2)}{k-1}$ $W_{1-2} = \frac{kR(T_1 - T_2)}{k-1}$
Теплоёмкость процесса	$C_n = C_{vm} \frac{n-k}{n-1}$	C_{pm}	C_{vm}	∞	0
Количество теплоты	$q_{1-2} = \Delta U + l_{1-2}$ $q_{1-2} = \Delta h + W_{1-2}$ $q_{1-2} = C_n(T_2 - T_1)$	$q_{1-2} = \Delta U + l_{1-2}$ $q_{1-2} = C_{pm}(T_2 - T_1)$	$q_{1-2} = \Delta h + W_{1-2}$ $q_{1-2} = C_{vm}(T_2 - T_1)$	$q_{1-2} = l_{1-2} = W_{1-2}$ $q_{1-2} = T\Delta S$	$q_{1-2} = 0$

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

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: ε - степень сжатия, $\varepsilon = v_1/v_2$; λ - степень повышения давления в процессе подвода тепла при $v = idem$, $\lambda = P_3/P_2$; ρ - степень предварительного расширения в процессе подвода тепла при $P = idem$, $\rho = v_3/v_2$ (для цикла Дизеля), $\rho = v_4/v_3$ (для цикла Сабатэ - Тринклера).

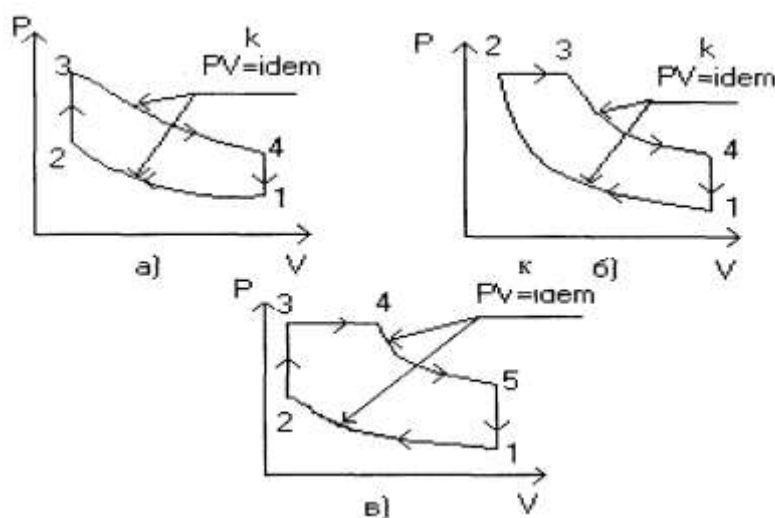


Рисунок 1 . Термодинамические циклы поршневых ДВС:
а) Отто, б) Дизеля, в) Сабатэ - Тринклера

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 ε , показателя адиабаты K , степени повышения давления λ и с уменьшением степени предварительного расширения ρ .

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

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

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 T , давления P , объема v , степени сжатия ε , степени повышения давления λ и степени предварительного расширения ρ выполнить расчет в следующей последовательности.

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

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 $\Delta u, \Delta h, \Delta s$, термодинамическую работу цикла l , теплообмен q в каждом из процессов. Вычислить работу l_u и КПД цикла η_u .

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

Таблица №3

Исходные данные для вариантов 1-22

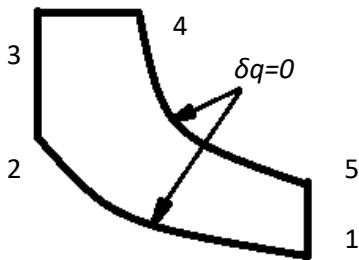
						$\varepsilon = V_1/V_2$ $\lambda = P_3/P_2$ $\rho = V_4/V_3$	
Задание №	ε	ρ	λ	№ состава смеси	Температура Т, К	Давление Р, МПа	Удельный объем v , м ³ /кг
1	17	1,5	1,7	5	T ₁ =350	-	v ₅ =0,35
2	16,5	1,4	1,6	9	350	-	0,3
3	16	1,3	1,6	14	300	-	0,35
4	17	1,3	1,7	17	350	-	0,3
5	16,5	1,5	1,7	21	300	-	0,35
6	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	-	v 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	-	v 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

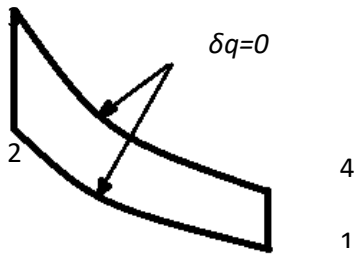
					$\varepsilon = V_1/V_2$ $\lambda = P_3/P_2$ $\rho = 1$	
Задание №	ε	λ	Температура Т, К	Давление Р, МПа	Удельный объем v , м ³ /кг	№ состава смеси
22	9	3,4	$T_2=750$	-	$v_4=1,3$	8
23	8	3,4	750	-	1,35	19
24	8,2	3,4	800	-	1,25	26
25	7,5	3,4	820	-	1,3	15
26	8,5	3,7	$T_1=350$	-	1,35	8
27	7,5	3,8	370	-	1,35	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	$T_3=2700$	-	$v_3=0,32$	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 ₂ O	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
ρ, 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 $r_{N_2}=0,1$;

оксид углерода $r_{CO}=0,45$

углекислый газ $r_{CO_2}=0,20$;

водяные пары $r_{H_2O}=0,25$.

Удельный объем в начале сжатия $v_1=0,35\text{ м}^3/\text{кг}$. Температура в конце предварительного расширения равна $T_4=2800\text{ К}$. 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; μ_i - молярная масса компонента смеси.

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

$$= 0,097$$

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

$$= 0,439$$

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

$$= 0,307$$

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

$$= 0,157$$

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.

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

$$189 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

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

$$R_{\text{смеси}} = 0,097 \cdot 296,9 + 0,439 \cdot 296,9 + 0,307 \cdot 189 + 0,157 \cdot 461,9$$

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

Газовая постоянная смеси:

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

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

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
$v, \text{м}^3/\text{кг}$	0,35	0,018	0,018	0,026	0,35
$P, \text{МПа}$		16,5	31,45	31,45	
$T, \text{К}$		1053	2000	2800	

Определим удельные объемы в каждой точке цикла.

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

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

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

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

Определим из уравнения состояния газа давление в точке 4:

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

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

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

По известной степени повышения давления определяется $P_2 = P_3/\lambda = 31,45/1,9 = 16,55 \text{ МПа}$.

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 неизвестных остальных параметров не-

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

$$T_2 = 1053 - 273 = 780^\circ \text{C}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$c_{vtсмеси} = 0,097 \cdot 0,798 + 0,439 \cdot 0,8098 + 0,307 \cdot 0,8918 + 0,157 \cdot 1,6072 = 0,9582 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Проверка:

$$c_{ptсмеси} - c_{vtсмеси} = R_{смеси}$$

$$1,2486 - 0,95882 = 0,2897 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Коэффициент адиабаты:

$$k = \frac{c_{ptсмеси}}{c_{vtсмеси}} = \frac{1,2486}{0,95882} = 1,30$$

Используя найденный коэффициент адиабаты, находится давление P_1 .

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

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

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

Из уравнения состояния газ находятся T_1 .

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

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

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

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

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

Из уравнения состояния газ находятся T_5 .

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

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
P , МПа	0,36	16,5	31,45	31,45	1,06
T , 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.

$$T_1 = 435 - 273 = 162^\circ \text{C}$$

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

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

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

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

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

$$c_{pm} = 0,097 \cdot 1,0418 + 0,439 \cdot 1,0444 + 0,307 \cdot 0,8933 + 0,157 \cdot 1,886 = 1,130 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}$$

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

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

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

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

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

Проверка:

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

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

Определим массовые теплоемкости смеси при температуре T_3 в точке 3.

$$T_3 = 2000 - 273 = 1727^\circ\text{C}$$

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

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

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

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

$$c_{pm\text{смеси}} = 0,097 \cdot 1,17562 + 0,439 \cdot 1,18762 + 0,307 \cdot 1,21143 + 0,157 \cdot 2,37056 = 1,3794 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

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

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

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

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

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

Проверка: $c_{pt\text{смеси}} - c_{vt\text{смеси}} = R_{\text{смеси}}$

$$1,3794 - 1,08973 \approx 0,2897 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Определим массовые теплоемкости смеси при температуре T_4 в точке 4.

$$T_4 = 2800 - 273 = 2527^\circ\text{C}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$c_{vt\text{смеси}} = 0,097 \cdot 0,91862 + 0,439 \cdot 0,93089 + 0,307 \cdot 1,077 + 0,157 \cdot 2,08526 = 1,1558 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Проверка: $c_{pt\text{смеси}} - c_{vt\text{смеси}} = R_{\text{смеси}}$

$$1,4153 - 1,1587 \approx 0,2897 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Определим массовые теплоемкости смеси при температуре T_5 в точке 5.

$$T_4 = 1280 - 273 = 1007^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned}
c_{pmN_2} &= c_{pmN_2}|_0^{1000} + (c_{pmN_2}|_0^{1100} - c_{pmN_2}|_0^{1000}) \cdot \\
0,07 &= 1,118 + (1,127 - 1,118) \cdot 0,07 = 1,11863 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \\
c_{pmCO} &= c_{pmCO}|_0^{1000} + (c_{pmCO}|_0^{1100} - c_{pmCO}|_0^{1000}) \cdot 0,07 = 1,13 + (1,14 - \\
1,13) \cdot 0,07 &= 1,1307 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \\
c_{pmCO_2} &= c_{pmCO_2}|_0^{1000} + (c_{pmCO_2}|_0^{1100} - c_{pmCO_2}|_0^{1000}) \cdot \\
0,07 &= 1,122 + (1,138 - 1,122) \cdot 0,07 = 1,12312 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \\
c_{pmH_2O} &= c_{pmH_2O}|_0^{1000} + (c_{pmH_2O}|_0^{1100} - c_{pmH_2O}|_0^{1000}) \cdot 0,07 = \\
2,144 + (2,177 - 2,144) \cdot 0,07 &= 2,14631 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \\
c_{pm\text{смеси}} &= 0,097 \cdot 1,11863 + 0,439 \cdot 1,1307 + 0,307 \cdot 1,12312 + 0,157 \cdot 2,144 = 1,285652 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \\
c_{vmN_2} &= c_{vmN_2}|_0^{1000} + (c_{vmN_2}|_0^{1100} - c_{vmN_2}|_0^{1000}) \cdot 0,07 = 0,821 + (0,830 - \\
0,821) \cdot 0,07 &= 0,82163 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \\
c_{vmCO} &= c_{vmCO}|_0^{1000} + (c_{vmCO}|_0^{1100} - c_{vmCO}|_0^{1000}) \cdot \\
0,07 &= 0,833 + (0,843 - 0,833) \cdot 0,07 = 0,8337 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \\
c_{vmCO_2} &= c_{vmCO_2}|_0^{1000} + (c_{vmCO_2}|_0^{1100} - c_{vmCO_2}|_0^{1000}) \cdot \\
0,07 &= 0,933 + (0,933 - 0,949) \cdot 0,07 = 0,93412 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \\
c_{vmH_2O} &= c_{vmH_2O}|_0^{1000} + (c_{vmH_2O}|_0^{1100} - c_{vmH_2O}|_0^{1000}) \cdot 0,07 = \\
1,682 + (1,715 - 1,682) \cdot 0,07 &= 1,68431 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \\
c_{vm\text{смеси}} &= 0,097 \cdot 0,82163 + 0,439 \cdot 0,8337 + 0,307 \cdot 0,93412 + 0,157 \cdot 1,68431 \\
&= 0,996904 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}
\end{aligned}$$

Проверка:

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

$$1,285652 - 0,996904 \approx 0,288748 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \approx 289,7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

4. Определим массовые теплоемкости для процессов:

Процесс 1-2

$$\begin{aligned}
c_{pm}|_{162}^{780} &= \frac{c_{pm}|_0^{780} \cdot 780 - c_{pm}|_0^{162} \cdot 162}{780 - 162} = \frac{1,2486 \cdot 780 - 1,13 \cdot 162}{780 - 162} = 1,27968 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \\
c_{vm}|_{162}^{780} &= \frac{c_{vm}|_0^{780} \cdot 780 - c_{vm}|_0^{162} \cdot 162}{780 - 162} = \frac{0,95882 \cdot 780 - 0,84018 \cdot 162}{780 - 162} = 0,98992 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}
\end{aligned}$$

Проверка:

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

$$1,27968 - 0,98992 \approx 0,2897 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Процесс 2-3

$$\begin{aligned}
c_{pm}|_{780}^{1727} &= \frac{c_{pm}|_0^{1727} \cdot 1727 - c_{pm}|_0^{780} \cdot 780}{1727 - 780} = \frac{1,3794 \cdot 1727 - 1,2486 \cdot 780}{1727 - 780} = \\
1,487134 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \\
c_{vm}|_{780}^{1727} &= \frac{c_{vm}|_0^{1727} \cdot 1727 - c_{vm}|_0^{780} \cdot 780}{1727 - 780} = \frac{1,08973 \cdot 1727 - 0,95882 \cdot 780}{1727 - 780} =
\end{aligned}$$

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

Проверка:

$$c_{pt\text{смеси}} - c_{vt\text{смеси}} = R_{\text{смеси}}$$

$$1,487134 - 1,197554 \approx 0,2896 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Процесс 3-4

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

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

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

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

Проверка:

$$c_{pt\text{смеси}} - c_{vt\text{смеси}} = R_{\text{смеси}}$$

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

Процесс 4-5

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

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

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

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

Проверка:

$$c_{pt\text{смеси}} - c_{vt\text{смеси}} = R_{\text{смеси}}$$

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

Процесс 5-1

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

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

Проверка:

$$c_{pt\text{смеси}} - c_{vt\text{смеси}} = R_{\text{смеси}}$$

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

Таблица №8

Процесс	Температура	$c_{pt\text{смеси}}$	$c_{vt\text{смеси}}$
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:

$$\Delta u_{1-2} = c_{vm_{смеси}}(t_2 - t_1) = 0,98992 \cdot (780 - 162) = 611,770 \text{ кДж/кг}$$

Изменение энтальпии:

$$\Delta h_{1-2} = c_{pm_{смеси}}(t_2 - t_1) = 1,27968 \cdot (780 - 162) = 790,848 \text{ кДж/кг}$$

Изменение энтропии:

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

Термодинамическая работа:

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

или

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

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

Процесс 2-3 – изохорный подвод тепла.

Изменение внутренней энергии:

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

Изменение энтальпии:

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

Изменение энтропии:

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

Термодинамическая работа в данном процессе не совершается:

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

Подводимое тепло равно изменению внутренней энергии

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

Процесс 3-4 – изобарный подвод тепла

Изменение внутренней энергии:

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

Изменение энтальпии:

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

Изменение энтропии:

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

Термодинамическая работа:

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

Подводимое тепло:

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

или

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

Процесс 4-5 – адиабатное расширение

Изменение внутренней энергии:

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

Изменение энтальпии:

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

Изменение энтропии:

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

Термодинамическая работа:

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

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

Процесс 5-1 – изохорный отвод тепла

Изменение внутренней энергии:

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

Изменение энтальпии:

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

Изменение энтропии:

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

Термодинамическая работа в данном процессе не совершается:

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

Отводимое тепло равно изменению внутренней энергии

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

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: $l_{ц} = 1556,7 \text{ кДж/кг}$

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

Отведенное тепло: $q_2 = -867,77 \text{ кДж/кг}$

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 $P_{1.1} = 8 \text{ МПа}$ ($P_1 < P_{1.1} < P_2$), по уравнению адиабаты:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

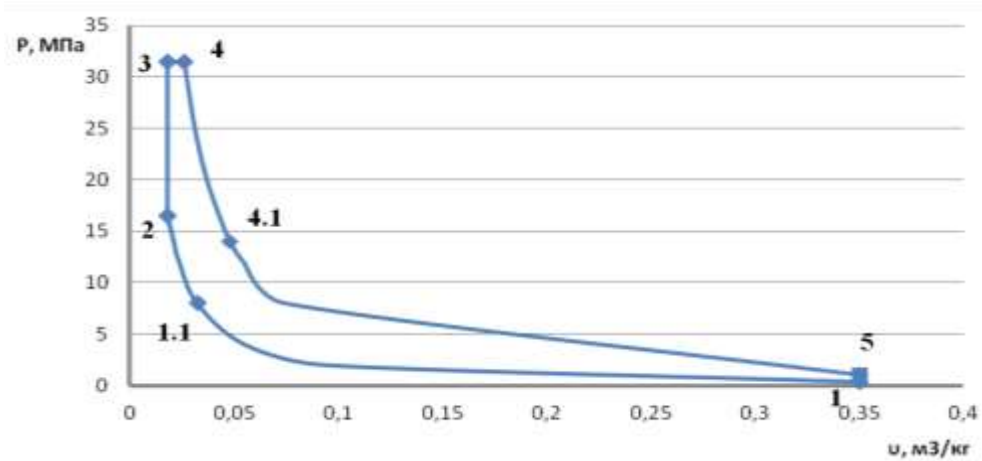


Рисунок 2. Термодинамический цикл поршневого ДВС со смешанным подводом тепла в PV координатах

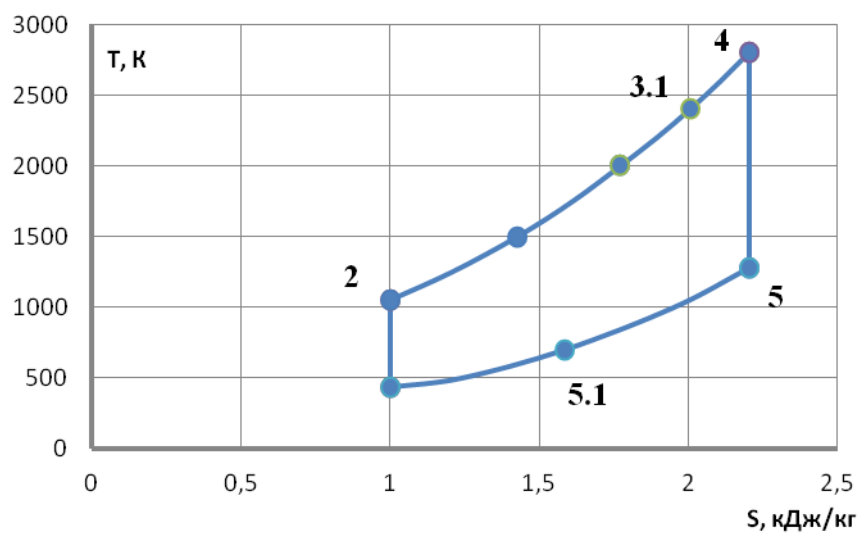


Рисунок 3. Термодинамический цикл поршневого ДВС со смешанным подводом тепла в TS координатах

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.И 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°C до $t^{\circ}\text{C}$, кДж/(кг·К)

t	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	H ₂ O	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	1,235	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°C до $t^{\circ}\text{C}$, кДж/(кг·К)

t	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	H ₂ O	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 60х90 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.