

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Блинова Светлана Павловна

Должность: Заместитель директора по учебно-воспитательной работе

Дата подписания: 29.09.2020 11:02:52

Уникальный программный ключ:

1cafd4e102a27ce11a89a2a7ceb30237f3ab5c65

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Норильский государственный индустриальный институт»  
Политехнический колледж

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ЗАОЧНОГО ОТДЕЛЕНИЯ**

по учебной дисциплине  
**ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ**

по специальности  
13.02.01 «Тепловые электрические станции»

Методические указания для обучающихся заочного отделения по дисциплине «Основы термодинамики» составлены на основе рабочей программы дисциплины в соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта по специальности среднего профессионального образования 13.02.01 Тепловые электрические станции.

Организация-разработчик: Политехнический колледж ФГБОУ ВО «Норильский государственный индустриальный институт»

Разработчик:  
Стрельникова Лилия Ивановна, преподаватель

Рассмотрена на заседании цикловой комиссии  
Тепловых электрических станций

Председатель комиссии \_\_\_\_\_ С.И. Семенова

Утверждена методическим советом политехнического колледжа ФГБОУ ВО «Норильский государственный индустриальный институт».

Протокол заседания методического совета № \_\_\_ от «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Зам. директора по УР \_\_\_\_\_ С.П. Блинова

## ВВЕДЕНИЕ

Обучающиеся специальности 13.02.01 «Тепловые электрические станции» изучают дисциплину «Основы термодинамики» в соответствии с рабочей программой.

Программой дисциплины предусмотрена самостоятельная работа обучающихся с различными источниками для изучения теоретического материала, решение практических задач и выполнение указанных в пособии заданий.

Дисциплина «Основы термодинамики» рассматривает изучение технической термодинамики, исследования закономерностей взаимного превращения тепловой и механической энергии.

В результате освоения учебной дисциплины обучающийся должен **уметь:**

- определять параметры состояния газа,
- рассчитывать состав газовой смеси;
- определять теплоемкость отдельного газа и смеси;
- пользоваться таблицами теплоемкостей;
- рассчитывать количество теплоты, работу, изменение внутренней энергии;
- проводить анализ основных термодинамических процессов;
- изображать газовые циклы в диаграммах;
- изображать газовые циклы в  $P, \nu$ - и  $T, S$ - диаграммах;
- читать схемы ГТУ.

В результате освоения учебной дисциплины обучающийся должен **знать:**

- основные газовые законы Авогадро, Гей-Люссака, Бойля-Мариотта;
- характеристические уравнения идеального газа;
- характеристики газовых смесей;
- понятие истинной и средней теплоемкости;
- зависимость теплоемкости от температуры;
- первый закон термодинамики;
- понятие теплоты, работы, внутренней энергии, энтальпии;
- термодинамические процессы идеальных газов;
- второй закон термодинамики;
- круговые газовые циклы, цикл Карно;
- циклы двигателей внутреннего сгорания (ДВС);
- циклы газотурбинных установок.

В результате освоения учебной дисциплины обучающийся должен овладеть общими и профессиональными компетенциями:

ОК 1. Понимать сущность и социальную значимость своей будущей профессии, проявлять к ней устойчивый интерес.

ОК 2. Организовывать собственную деятельность, определять методы и способы выполнения профессиональных задач, оценивать их эффективность и качество.

ОК 3. Принимать решения в стандартных и нестандартных ситуациях и нести за них ответственность.

ОК 4. Осуществлять поиск и использование информации, необходимой для эффективного выполнения профессиональных задач, профессионального и личностного развития.

ОК 5. Использовать информационно-коммуникационные технологии в профессиональной деятельности.

ОК 6. Работать в коллективе и в команде, эффективно общаться с коллегами, руководством, потребителями.

ОК 7. Брать на себя ответственность за работу членов команды (подчиненных), за результат выполнения заданий.

ОК 8. Самостоятельно определять задачи профессионального и личностного развития, заниматься самообразованием, осознанно планировать повышение квалификации.

ОК 9. Ориентироваться в условиях частой смены технологий в профессиональной деятельности.

ПК 1.3. Контролировать работу тепловой автоматики и контрольно-измерительных приборов в котельном цехе.

ПК 2.3. Контролировать работу тепловой автоматики, контрольно-измерительных приборов, электрооборудования в турбинном цехе.

ПК 2.4. Проводить наладку и испытания основного и вспомогательного оборудования турбинного цеха.

ПК 3.1. Планировать и обеспечивать подготовительные работы по ремонту теплоэнергетического оборудования.

ПК 3.2. Определять причины неисправностей и отказов работы теплоэнергетического оборудования.

ПК 3.3. Проводить ремонтные работы и контролировать качество их выполнения.

ПК 4.1. Управлять параметрами производства тепловой энергии.

ПК 4.2. Определять технико-экономические показатели работы основного и вспомогательного оборудования ТЭС.

ПК 4.3. Оптимизировать технологические процессы.

## **1 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ**

После изучения теоретического материала, студенты должны знать ответы на вопросы самоконтроля знаний для успешной сдачи экзамена по дисциплине и письменно выполнить решение, указанные после темы задач. Номер варианта задачи соответствует порядковому номеру студента в журнале. Вычисления выполняются с точностью до 2 значащих цифр, после запятой. Использовать размерность системы СИ. Размерность физических величин в окончательных результатах указывать обязательно.

*Работа должна быть правильно оформлена:*

- написана разборчиво от руки в тетради из 12 листов;
- лист бумаги должен иметь поля (не менее 2,5 см);
- порядок выполнения заданий должен указываться в листе содержания (приложение Г) с указанием страниц.
- пример оформления титульного листа указан в приложении В.
- составлен список изученной литературы;
- страницы должны быть пронумерованы;
- последний лист оставить свободным для рецензии.

Контрольная работа выполняется в сроки установленные графиком учебного процесса.

Если работа не зачтена, то необходимо выполнить рекомендации по доработке в той же тетради и представить ее вновь на рецензирование.

Итогом изучения дисциплины является экзамен.

## 2 ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН

№ п/п	Наименование разделов и тем
1	2
	<b>Раздел 1. Основы технической термодинамики</b>
1.1	Параметры состояния тела. Основные газовые законы. Газовые смеси
1.2	Теплоёмкость газов и газовых смесей
1.3	Первый закон термодинамики. Внутренняя энергия и работа. Энтальпия.
1.4	Исследование термодинамических процессов в газах. P,v- и T,S - диаграммы.
1.5	Второй закон термодинамики. Энтропия. Круговые циклы. Циклы Карно.
1.6	Газовые циклы.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### Раздел 1 Основы технической термодинамики

#### Тема 1.1 Параметры состояния тела. Основные газовые законы.

##### Газовые смеси

Студент должен:

*Знать:* основные параметры состояния рабочего тела; единицы измерения параметров в системе СИ и других системах измерений физических величин; характеристики идеального и реальных газов; основные газовые законы; уравнение состояния идеального газа; свойства газовых смесей;

*уметь:* определять параметры состояния рабочих тел, рассчитывать характеристики газовых смесей.

##### Вопросы темы

Основные термодинамические параметры состояния рабочего тела: температура, давление, удельный объем и плотность. Единицы измерения параметров.

Идеальный и реальный газ. Законы Бойля-Мариотта, Гей-Люссака. Уравнение состояния идеального газа. Газовая постоянная, ее физический смысл. Частные случаи изменения состояния газа. Закон Авогадро. Уравнение Менделеева-Клапейрона. Универсальная газовая постоянная.

Соотношение между массовым и объемным составом смеси. Вычисление кажущейся молекулярной массы смеси; газовой постоянной смеси и парциального давления газов.

### Основные теоретические положения

#### Параметры состояния тела. Основные газовые законы

Если температура газа не изменяется ( $T = const$ ), то давление газа и его удельный объем связаны следующей зависимостью (закон Бойля-Мариотте):

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{v_2}{v_1} \text{ или } P_1 v_1 = P_2 v_2 = const \quad (1.1)$$

Если давление газа остается постоянным ( $P = const$ ), то соотношение между удельными объемом газа и его абсолютной температурой подчиняется закону Гей-Люссака:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2} \text{ или } \frac{v}{T} = const; \rho T = const. \quad (1.2)$$

Для газов, взятых при одинаковых температурах и давлениях, имеет место следующая зависимость, полученная на основе закона Авогадро:

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2} \text{ или } \frac{v_2}{v_1} = \frac{\mu_1}{\mu_2}; \Rightarrow \frac{\mu}{\rho} = \mu v = const, \quad (1.3)$$

где  $\mu$  – молекулярная масса газа;

$\rho$  – плотность газа.

Плотность газа при нормальных условиях определяется из равенства:

$$\rho_n = \frac{\mu}{22,4}, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}. \quad (1.4)$$

Удельный объем газа при нормальных условиях:

$$\nu_n = \frac{22,4}{\mu}, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}. \quad (1.5)$$

Характеристическое уравнение идеального газа или уравнение состояния связывает между собой основные параметры состояния - давление, объем, температуру и может быть представлено следующими уравнениями:

– для  $M$  кг газа  $PV = MRT;$  (1.6)

– для 1 кг газа  $P\nu = RT;$  (1.7)

– для 1 кмоль газа  $PV_\mu = \mu RT,$  (1.8)

где  $P$  – давление газа,  $\frac{\text{Н}}{\text{м}^2};$

$V$  – объем газа,  $\text{м}^3;$

$M$  – масса газа,  $\text{кг};$

$\nu$  – удельный объем газа,  $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}};$

$V_\mu$  – объем 1 кмоль газа,  $\frac{\text{м}^3}{\text{кмоль}};$

$R$  – газовая постоянная для 1 кг газа,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$

$\mu R$  – универсальная газовая постоянная 1 кмоль газа,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}.$

Выражение (1.8) - носит название уравнения Менделеева-Клапейрона.

Численное значение универсальной газовой постоянной легко получить из выражения (1.8), при подставке значений, входящих в него величин при нормальных условиях:

$$\mu R = \frac{PV_\mu}{T} = \frac{101325 \cdot 22,4}{273} = 8314, \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}. \quad (1.9)$$

В характеристическое уравнение идеального газа необходимо всегда подставлять давление  $P$  выраженное в  $\text{Па}$ , а температуру  $T$  в  $^\circ\text{К}$ .

Газовая постоянная, отнесенная к 1 кг газа, определяется из выражения:

$$R = \frac{8314}{\mu}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}. \quad (1.10)$$

### Газовые смеси

Состав газовой смеси определяется количеством каждого из газов, входящих в смесь и может быть задан массовыми или объемными долями.

Массовая доля  $m_n$  определяется отношением массы отдельного газа  $M_n$ , входящего в смесь, к массе всей смеси  $M$ .

$$m_n = \frac{M_n}{M}, m_1 = \frac{M_1}{M}, m_2 = \frac{M_2}{M}. \quad (1.11)$$

Объемной долей  $r_n$  газа называют отношение объема каждого компонента, входящего в смесь, к объему всей газовой смеси, при условии, что объем каждого компонента, отнесен к давлению и температуре смеси (приведенный объем):

$$r_n = \frac{V_n}{V}, r_1 = \frac{V_1}{V}, r_2 = \frac{V_2}{V}. \quad (1.12)$$

Очевидно, что:

$$M_1 + M_2 + \dots + M_n = M, \quad (1.13)$$

$$m_1 + m_2 + \dots + m_n = 1, \quad (1.14)$$

$$V_1 + V_2 + \dots + V_n = V, \quad (1.15)$$

$$r_1 + r_2 + \dots + r_n = 1. \quad (1.16)$$

Связь между давлением газовой смеси  $P$  и парциальными давлениями отдельных компонентов  $P_i$  входящих в смесь, устанавливается следующей зависимостью (закон Дальтона)

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_n. \quad (1.17)$$

Парциальное давление отдельного газа входящего в смесь определяется:

$$P_i = P \cdot r_i; \quad P_i = P \cdot r_i, \text{ если смесь задана объемными долями,}$$

$$\text{и } P_i = m_i \frac{R_i}{R_{CM}} \cdot P$$

Плотность смеси  $\rho_{CM}$ ; удельный объем смеси  $v_{CM}$ ; кажущаяся молекулярная масса смеси  $\mu_{CM}$  и газовая постоянная смеси рассчитываются по формулам таблицы 1.1.

Таблица 1.1 - Формулы для расчета газовых смесей

Задание состава смеси	Плотность и удельный объем смеси	Кажущаяся молекулярная масса смеси	Газовая постоянная смеси	Парциальное давление
Массовыми долями	$v_{CM} = \sum_1^n \frac{m_i}{\rho_i}$ $\rho_{CM} = \frac{1}{\sum_1^n \frac{m_i}{\rho_i}}$	$\mu_{CM} = \frac{1}{\sum_1^n \frac{m_i}{\mu_i}}$	$R_{CM} = \sum_1^n m_i R_i$	$p_i = m_i \cdot \frac{R_i}{R_{CM}} p$
Объемными долями	$\rho_{CM} = \sum_1^n r_i \rho_i$ $v_{CM} = \frac{1}{\sum_1^n r_i \rho_i}$	$\mu_{CM} = \sum_1^n r_i \mu_i$	$R_{CM} = \frac{8314}{\sum_1^n r_i \mu_i}$	$p_i = r_i p$

### Вопросы для самоконтроля

1. Дать определение идеального газа.
2. Определение манометрического давления.

3. Определение вакуумметрического давления.
4. Какие условия называются нормальными.
5. Пояснить физический смысл универсальной газовой постоянной.
6. Пояснить физический смысл газовой постоянной.

Рекомендуемая литература:

[ 1 с.2]; [ 2 с.8;17;30]

### Типовые задачи с решениями

#### Пример 1

Ртутный вакуумметр, присоединенный к сосуду, показывает разряжение  $h = 420$  мм при температуре ртути в вакуумметре  $t=20$  °С. Давление атмосферы по ртутному барометру составляет 768 мм при температуре  $t=18$  °С. Определить абсолютное давление в сосуде.

*Решение:*

Приводим показания ртутных приборов (барометра и вакуумметра) к нулю градусам по формуле:

$$P_{бар}^0 = P_{бар}^t \cdot (1 - 0,000172 \cdot t) ,$$

где  $P_{бар}^0$  – показание барометра, приведенное к 0°С,  
 $P_{бар}^t$  - действительная высота ртутного столба при температуре воздуха,  $t$ °С,

0,000172 – коэффициент объемного расширения ртути

Определяем разряжение в сосуде приведенное к 0°С :

$$P_{раз}^0 = 420 \cdot (1 - 0,000172 \cdot 20) = 418,5 \text{ мм рт ст}$$

Определяем барометрическое давление, приведенное к 0°С:

$$P_{бар}^0 = 768 \cdot (1 - 0,000172 \cdot 18) = 765,6 \text{ мм рт ст}$$

Определяем абсолютное давления в сосуде по формуле:

$$P_{абс} = P_{бар} - P_{вак} = 765,6 - 418,5 = 347,1 \text{ мм рт ст}$$

#### Пример 2

Баллон с кислородом емкостью 20 л находится под давлением 10 Мн/м<sup>2</sup> при 15°С. После израсходования части кислорода давление понизилось до 7,6 Мн/м<sup>2</sup>, а температура упала до 10°С. Определить массу израсходованного кислорода. Газовая постоянная кислорода  $R=259,8$  Дж/кг К.

*Решение:*

Из характеристического уравнения

$$PV = MRT$$

Имеем

$$M = \frac{PV}{RT}$$

Следовательно, до расходування кислорода масса его составляла

$$M_1 = \frac{10 \cdot 10^6 \cdot 0,02}{259,8 \cdot 288} = 2,673 \text{ кг,}$$

а после израсходования

$$M_2 = \frac{7,6 \cdot 10^6 \cdot 0,02}{259,8 \cdot 283} = 2,067 \text{ кг.}$$

Таким образом расход кислорода составил:

$$M = M_1 - M_2 = 2,673 - 2,067 = 0,606 \text{ кг}$$

### Пример 3

Смесь газов имеет массовый состав  $m_1(O_2)=5\%$ ;  $m_2(CO)=75\%$ ;  $m_3(N_2)=20\%$ . Определить кажущуюся молекулярную массу  $\mu_{см}$ , парциальные давления  $P_i$  компонентов смеси при заданном давлении  $P_{см}=760\text{мм.рт.ст}$ , удельный объем смеси  $V_{см}$ , плотность смеси  $\rho_{см}$  и газовую постоянную смеси  $R_{см}$ . Удельный объем, плотность, газовая постоянная и молекулярная масса каждого газа приводится в таблице А1 (Приложение А)

*Решение:*

1) Переводим процентное содержание отдельных газов, входящих в смесь в численные значения массовых долей:

$$m_{O_2} = 0,05; \quad m_{CO} = 0,75; \quad m_{N_2} = 0,2$$

2) По таблице А1 (Приложение А) берем значения  $\mu, \rho, R$  для каждого газа, входящего в смесь:

$$\mu_{O_2}=32; \quad \rho_{O_2}=1,429 \text{ кг/м}^3; \quad R_{O_2}=0,2598 \text{ Кдж/кгК}$$

$$\mu_{CO}=28,01; \quad \rho_{CO}=1,250 \text{ кг/м}^3; \quad R_{CO}=0,2968 \text{ Кдж/кгК}$$

$$\mu_{N_2}=28,026; \quad \rho_{N_2}=1,251 \text{ кг/м}^3; \quad R_{N_2}=0,2968 \text{ Кдж/кгК}$$

3) Определяем исходные параметры смеси:

Удельный объем смеси:

$$V_{см} = \sum_1^n \frac{m_i}{\rho_i} = \frac{0,05}{1,429} + \frac{0,75}{1,25} + \frac{0,2}{1,251} = 0,79 \text{ м}^3 / \text{кг};$$

Плотность смеси:

$$\rho_{см} = \frac{1}{V_{см}} = 1,27 \text{ кг/м}^3;$$

Молекулярная масса смеси:

$$\mu_{см} = \frac{1}{\sum_1^n \frac{m_i}{\mu_i}} = \frac{1}{\frac{0,05 + 0,75 + 0,2}{32 + 28,01 + 28,026}} = 25$$

Газовая постоянная смеси:

$$R_{см} = \sum_1^n m_i \cdot R_i = 0,05 \cdot 0,259,8 + 0,75 \cdot 0,2968 + 0,2 \cdot 0,2968 = 0,29495 \text{ КДж/}$$

кгК

Парциальное давление газов:

$$P_{O_2} = m_{O_2} \frac{R_{O_2}}{R_{см}} \cdot p_{см} = 0,05 \cdot \frac{0,2598}{0,29495} \cdot 760 = 33,47 \text{ ммрт.ст.}$$

$$P_{CO} = m_{CO} \frac{R_{CO}}{R_{см}} \cdot p_{см} = 0,75 \cdot \frac{0,2968}{0,29495} \cdot 760 = 573,58 \text{ ммрт.ст.}$$

$$P_{N_2} = m_{N_2} \frac{R_{N_2}}{R_{см}} \cdot p_{см} = 0,2 \cdot \frac{0,2968}{0,29495} \cdot 760 = 152,95 \text{ ммрт.ст.}$$

## Задачи для самостоятельного решения

### Задача №1

Определить абсолютное давление газа в сосуде, если показание присоединенного к нему ртутного манометра равно 500 мм рт ст, а атмосферное давление по ртутному барометру составляет 750 мм. Температура воздуха в месте установки приборов равна 0°C.

### Задача №2

Воздух, заключенный в баллоне емкостью 0,9 м<sup>3</sup> выпускают в атмосферу. Температура его в начале равна 27°C. Определить массу выпущенного воздуха. Если начальное давление в баллоне составляет 93,2 бар, после выпуска- 42,2 бар, а температура воздуха снизилась до 17°C.

### Задача №3

Атмосферный воздух имеет следующий состав:  $r_{N_2} = 76,8 \%$  и  $r_{O_2} = 23,2 \%$ . Определить объемный состав воздуха, его газовую постоянную, кажущуюся молекулярную массу и парциальные давления кислорода и азота, если давление воздуха по барометру составляет 760 мм рт ст.

### Задача №4

В закрытом сосуде емкостью  $V = 0,3 \text{ м}^3$  содержится 2,75 кг воздуха при давлении  $P_1 = 8$  бар и температуре  $t_1 = 25$  °C. Определить давление и удельный объем после охлаждения воздуха до 0 °C.

### Задача №5

В закрытом сосуде заключен газ при разрежении  $P_1 = 50$  мм рт ст и температуре  $t_1 = 70$  °C. Показание барометра равно 760 мм рт ст. До какой температуры нужно охладить газ, чтобы разрежение стало равным  $P_2 = 100$  мм рт ст.

## Тема 1.2 Теплоемкость газов и газовых смесей

Студент должен:

*Знать:* понятия «теплоемкость» и «количество теплоты»; виды теплоемкостей и соотношение между ними; единицы измерения теплоемкостей;

*уметь:* Определять теплоемкость по формулам, таблицам и опытным путем.

### Вопросы темы

Теплоемкость и количество теплоты. Массовая, объемная и мольная теплоемкости, изобарная и изохорная теплоемкости, соотношения между ними. Средняя и истинная теплоемкости.

Линейная и нелинейная зависимость теплоемкости от температуры. Экспериментальные методы определения значений теплоемкости. Таблицы теплоемкости. Теплоемкость газовой смеси.

### Основные теоретические положения

Удельной теплоемкостью или просто теплоемкостью называется количество теплоты, которое необходимо сообщить единице количества газа для изменения температуры на  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  в данном процессе.

В зависимости от единицы количества газа теплоемкости могут быть массовые  $c$ , объемные  $c'$  и мольные  $\mu c$  между которыми существуют следующие соотношения

$$c = c' \nu_H = \frac{\mu c}{\mu} \text{ или} \quad (1.18)$$

$$c' = c \rho_H = \frac{\mu c}{22,4}, \quad (1.19)$$

где  $\nu_H$ ,  $\rho_H$ ,  $22,4$  – соответственно удельный объем, плотность и объем одного киломоля газа при нормальных условиях.

Истинной теплоемкостью называется отношение количества тепла  $dq$ , сообщенное в элементарном процессе  $1\text{ кг}$  газа, к бесконечно малому изменению температуры  $dt$ :  $c = \frac{dq}{dt}$  средней теплоемкостью  $C_m$  называется количеством тепла, которое расходуется в процессе нагревания  $1\text{ кг}$  газа на  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  в интервале температур от  $t_1$  до  $t_2$ :

$$C_m = \frac{q}{t_2 - t_1}. \quad (1.20)$$

Различают изохорную и изобарную теплоемкость:

– теплоемкость газа в изохорном процессе  $\nu = const$  называется изохорной и обозначается:  $c_\nu$  - массовая,  $c_\nu'$  - объемная и  $\mu c_\nu$  – мольная;

– теплоемкость газа в изобарном процессе  $P = const$  называется изобарной и обозначается:  $c_p$  - массовая,  $c_p'$  - объемная и  $\mu c_p$  – мольная.

Между мольными теплоемкостями при постоянном давлении и объеме существует следующая зависимость:

$$\mu c_p - \mu c_v = \mu R \approx 8,314, \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}. \quad (1.21)$$

Между массовыми теплоемкостями существует следующая зависимость:

$$c_p = c_v + R \text{- уравнение Майера, } \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}. \quad (1.22)$$

Между изобарными и изохорными существует зависимость, которая носит название, показателя адиабаты и обозначается  $\kappa$ :

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} = \frac{c_p'}{c_v'} = \frac{\mu c_p}{\mu c_v} = 1 + \frac{R}{c_v}. \quad (1.23)$$

Численное значение  $\kappa$  – находится из соотношения малых теплоемкостей взятых из таблиц.

Для одноатомных газов  $\kappa = 1,67$ ;

для двухатомных газов  $\kappa = 1,4$ ;

для трехатомных газов  $\kappa = 1,29$ .

#### *Зависимость теплоемкости газов от температуры*

Теплоемкость всех газов кроме одноатомных с повышением температуры увеличивается. В небольшом температурном интервале для двух, реже трехатомных газов зависимость теплоемкости от температуры принимается линейной и выражается уравнением вида:

$$c = a + bt, \quad (1.24)$$

где  $a$  – значение теплоемкости при  $t = 0$  °С;

$b$  – постоянный коэффициент, характеризующий скорость возрастания теплоемкости с повышением температуры.

Определяют среднюю линейную теплоемкость по эмпирическим формулам для каждого отдельного газа таблица 1 по этим формулам вместо  $t$  нужно подставлять сумму температур  $(t_1 + t_2)$  начала и конца процесса.

Более точные значения средней теплоемкости получаются при учете ее нелинейной зависимости от температуры, вычисляемой по формуле:

$$cm' = \frac{cm'_0 \frac{t_2}{t_2 - t_1} - cm'_0 \frac{t_1}{t_2 - t_1}}{t_2 - t_1}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \quad (1.25)$$

где  $cm'_0 \frac{t_2}{t_2 - t_1}$  и  $cm'_0 \frac{t_1}{t_2 - t_1}$  – средние нелинейные теплоемкости от 0 °С до  $t_2$  и от 0 °С до  $t_1$ , которые берутся из таблиц П1 – П4 (Приложение Б)

Аналогичными являются формулы для определения объемных и мольных теплоемкостей.

#### Теплоемкость смеси газов

При задании смеси массовыми долями массовая теплоемкость смеси определяются по формуле:

$$c_{см} = m_1c_1 + m_2c_2 + \dots + m_nc_n, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \quad (1.26)$$

где  $m_1c_1$ ;  $m_nc_n$  – произведения массовой доли на массовую теплоемкость каждого газа входящего в смесь в данном процессе.

При задании смеси объемными долями объемная теплоемкость смеси находится:

$$c'_{см} = r_1c'_1 + r_2c'_2 + \dots + r_nc'_n, \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}, \quad (1.27)$$

где  $r_nc'_n$  – произведение объемной доли на объемную теплоемкость каждого газа входящего в смесь.

#### Мольная теплоемкость:

$$\mu c_{CM} = \sum_1^n r_n \cdot \mu c_n, \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}} \quad (1.28)$$

Для вычисления количества тепла, которое необходимо затратить в процессе нагревания  $l$  кг газа в интервале температур от  $t_1$  °C до  $t_2$  пользуются формулой:

$$q = cm \int_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) = cm_2t_2 - cm_1t_1, \quad (1.29)$$

где  $cm_1$  и  $cm_2$  – соответственно средние теплоемкости в пределах от 0 °C до  $t_1$  и от 0 °C до  $t_2$ .

В изохорном процессе  $v = const$  количество тепла, затрачиваемое в процессе, будет вычисляться:

$$q_v = c_v m_2 \cdot t_2 - c_v m_1 \cdot t_1, \quad (1.30)$$

в изобарном соответственно:

$$q_p = c_p m_2 \cdot t_2 - c_p m_1 \cdot t_1. \quad (1.31)$$

Если в процессе участвуют  $M$  кг или  $V_H$  м<sup>3</sup> газа, то подсчет тепла производится по формулам:

$$Q_v = M(c_v m_2 \cdot t_2 - c_v m_1 \cdot t_1) = V_H(c'_v m_2 \cdot t_2 - c'_v m_1 \cdot t_1) \quad (1.32)$$

$$Q_p = M(c_p m_2 \cdot t_2 - c_p m_1 \cdot t_1) = V_H(c'_p m_2 \cdot t_2 - c'_p m_1 \cdot t_1) \quad (1.33)$$

### Вопросы для самоконтроля

1. Что устанавливает закон Дальтона.
2. Дать определение парциальному давлению.
3. Дать определение кажущейся молекулярной массе газовой смеси.
4. Чему равна сумма массовых долей?
5. Чему равна сумма объемных долей?
6. Дать определение истинной теплоемкости.
7. Дать определение средней теплоемкости.
8. Что устанавливает уравнение Майера?

Рекомендуемая литература:

[ 1 с.32 ]; [2 с.39 ]

### Типовые задачи с решениями

#### Пример 4

Смесь газов имеет массовый состав  $m_{CO} = 0,75$ ;  $m_{N_2} = 0,2$ .

Определить состав газовой смеси, среднюю массовую теплоемкость при изобарном и изохорном процессах нагревания в интервале температур от 100 °С до 150 °С, считая зависимость теплоемкости от температуры нелинейной.

*Решение:*

1) По таблице А1 (Приложение А) берем значения  $\mu, \rho, R$  для каждого газа, входящего в смесь:  $\mu_{O_2} = 32$ ;  $\rho_{O_2} = 1,429$ ;  $R_{O_2} = 0,2598$ ;  $\mu_{CO} = 28,01$ ;  $\rho_{CO} = 1,250$ ;  $R_{CO} = 0,2968$ ;  $\mu_{N_2} = 28,026$ ;  $\rho_{N_2} = 1,251$ ;  $R_{N_2} = 0,2968$

2) Определяем исходные параметры смеси:

Объем смеси:

$$V_{см} = \sum_1^n \frac{m_i}{\rho_i} = \frac{0,05}{1,429} + \frac{0,75}{1,25} + \frac{0,2}{1,251} = 0,79 \text{ м}^3 / \text{кг};$$

Плотность смеси:

$$\rho_{см} = \frac{1}{V_{см}} = 1,27 \text{ кг} / \text{м}^3;$$

Молярная масса смеси:

$$\mu_{см} = \frac{1}{\sum_1^n \frac{m_i}{\mu_i}} = \frac{1}{\frac{0,05 + 0,75 + 0,2}{32 + 28,01 + 28,026}} = 25;$$

Газовая постоянная смеси:

$$R_{см} = \sum_1^n m_i \cdot R_i = 0,05 \cdot 0,259,8 + 0,75 \cdot 0,2968 + 0,2 \cdot 0,2968 = 0,29495 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}$$

Парциальное давление газов:

$$P_{O_2} = m_{O_2} \frac{R_{O_2}}{R_{см}} \cdot p_{см} = 0,05 \cdot \frac{0,2598}{0,29495} \cdot 760 = 33,47 \text{ ммрт.ст.}$$

$$P_{CO} = m_{CO} \frac{R_{CO}}{R_{см}} \cdot p_{см} = 0,75 \cdot \frac{0,2968}{0,29495} \cdot 760 = 573,58 \text{ ммрт.ст.}$$

$$P_{N_2} = m_{N_2} \frac{R_{N_2}}{R_{см}} \cdot p_{см} = 0,2 \cdot \frac{0,2968}{0,29495} \cdot 760 = 152,95 \text{ ммрт.ст.}$$

3) Определим среднюю массовую теплоемкость при изобарном процессе нагревания от  $100^\circ\text{C}$  и  $150^\circ\text{C}$  для каждого газа:

Определяем среднюю массовую изобарную теплоемкость газов при  $100^\circ\text{C}$  и  $150^\circ\text{C}$  по таблице П1 (Приложение Б):

$$C_{Pm}(O_2) \Big|_0^{100} = 0,9232 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}; \quad C_{Pm}(O_2) \Big|_0^{150} = 0,9293 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}};$$

$$C_{Pm}(CO) \Big|_0^{100} = 1,0417 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}; \quad C_{Pm}(CO) \Big|_0^{150} = 1,0467 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}};$$

$$C_{Pm}(N_2) \Big|_0^{100} = 1,0404 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}; \quad C_{Pm}(N_2) \Big|_0^{150} = 1,0419 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}$$

Определяем среднюю массовую теплоемкость при изобарном нагревании от  $100^\circ\text{C}$  и  $150^\circ\text{C}$  для  $O_2$ :

$$C_{Pm}(O_2) = \frac{C_{Pm} \Big|_0^{150} \cdot T_2 - C_{Pm} \Big|_0^{100} \cdot T_1}{T_2 - T_1} = \frac{0,9293 \cdot 150 - 0,9232 \cdot 100}{50} = 0,94$$

$$\frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}$$

Найдем среднюю массовую теплоемкость при изобарном нагревании от  $100^\circ\text{C}$  и  $150^\circ\text{C}$  для  $CO$ :

$$C_{Pm}(CO) = \frac{C_{Pm} \Big|_0^{150} \cdot T_2 - C_{Pm} \Big|_0^{100} \cdot T_1}{T_2 - T_1} = \frac{1,0467 \cdot 150 - 1,0417 \cdot 100}{50} = 1,05 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}$$

Найдем среднюю массовую теплоемкость при изобарном нагревании для  $N_2$ :

$$C_{Pm}(N_2) = \frac{C_{Pm} \Big|_0^{150} \cdot T_2 - C_{Pm} \Big|_0^{100} \cdot T_1}{T_2 - T_1} = \frac{1,0419 \cdot 150 - 1,0404 \cdot 100}{50} = 1,04 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}$$

4) Определяем среднюю массовую теплоемкость смеси при изобарном процессе:

$$C_{Pmсм} = \sum_1^n m_i \cdot C_{Pmi} = 0,05 \cdot 0,94 + 0,75 \cdot 1,05 + 0,2 \cdot 1,04 = 1,0425 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}$$

5) Найдем среднюю массовую теплоемкость смеси при изохорном процессе:

Определяем среднюю массовую теплоемкость каждого газа, входящего в смесь по формуле:  $C_{Vm} = C_{Pm} - R$

$$C_{Vm}(O_2) = C_{Pm}(O_2) - R(O_2) = 0,94 - 0,2598 = 0,68 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}$$

$$C_{Vm}(CO) = C_{Pm}(CO) - R(CO) = 10,04 - 0,2968 = 0,74 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}$$

$$C_{Vm}(N_2) = C_{Pm}(N_2) - R(N_2) = 1,05 - 0,2968 = 0,75 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}},$$

либо находим по таблице Б2 (Приложение Б):

$$C_{vm}(O_2) \Big|_0^{100} = 0,663 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}; \quad C_{vm}(O_2) \Big|_0^{150} = 0,67 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}};$$

$$C_{vm}(CO) \Big|_0^{100} = 0,745 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}; \quad C_{vm}(CO) \Big|_0^{150} = 0,747 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}};$$

$$C_{vm}(N_2) \Big|_0^{100} = 0,743 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}; \quad C_{vm}(N_2) \Big|_0^{150} = 0,745 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}$$

Определяем среднюю массовую теплоемкость при изохорном нагревании от  $100^\circ\text{C}$  и  $150^\circ\text{C}$  для  $O_2$ :

$$C_{vm}(O_2) = \frac{C_{vm} \Big|_0^{150} \cdot T_2 - C_{vm} \Big|_0^{100} \cdot T_1}{T_2 - T_1} = \frac{0,67 \cdot 150 - 0,663 \cdot 100}{50} = 0,684 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}$$

Найдем среднюю массовую теплоемкость при изобарном нагревании от  $100^\circ\text{C}$  и  $150^\circ\text{C}$  для  $CO$ :

$$C_{vm}(CO) = \frac{C_{vm} \Big|_0^{150} \cdot T_2 - C_{vm} \Big|_0^{100} \cdot T_1}{T_2 - T_1} = \frac{0,747 \cdot 150 - 0,745 \cdot 100}{50} = 0,75 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}$$

Найдем среднюю массовую теплоемкость при изобарном нагревании для  $N_2$ :

$$C_{vm}(N_2) = \frac{C_{vm} \Big|_0^{150} \cdot T_2 - C_{vm} \Big|_0^{100} \cdot T_1}{T_2 - T_1} = \frac{0,745 \cdot 150 - 0,743 \cdot 100}{50} = 0,75 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}$$

Определяем среднюю массовую теплоемкость смеси при изохорном нагревании:

$$C_{Vm см} = \sum_1^n m_i \cdot C_{Vm i} = 0,05 \cdot 0,684 + 0,75 \cdot 0,75 + 0,2 \cdot 0,75 = 0,747 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}$$

## **Задачи для самостоятельного решения**

### **Задача №6**

Вычислить среднюю массовую и среднюю объемную теплоемкость двуокиси углерода при постоянном объеме в интервале температур от 0 °С до 780 °С, считая зависимость теплоемкости от температуры нелинейной.

Задачу решить с помощью таблиц нелинейной зависимости теплоемкости от температуры Б1-Б4 (Приложение Б).

### **Задача №7**

Вычислить среднюю массовую и среднюю объемную теплоемкость азота при постоянном давлении в интервале температур от 250 °С до 570 °С, считая зависимость теплоемкости от температуры линейной. Задачу решить с помощью эмпирических формул, взятых из таблицы В1 (Приложение В).

## **Тема 1.3 Первый закон термодинамики. Внутренняя энергия и работа. Энтальпия**

Студент должен:

*Знать:* сущность первого закона термодинамики и его математическое выражение;

*уметь:* определять количество теплоты, работу, изменение внутренней энергии.

### *Вопросы темы*

Первый закон термодинамики – закон сохранения и превращения тепловой и механической энергии. Внутренняя энергия и работа газа. Математическое выражение первого закона термодинамики. Единицы измерения теплоты и работы. Энтальпия газа. Определение работы, изменение внутренней энергии и количества теплоты.

## **Основные теоретические положения**

### *Внутренняя энергия*

Внутреннюю энергию газа составляет сумма внутренней кинематической и внутренней потенциальной энергии.

Внутренняя кинематическая энергия зависит от скорости движения и массы молекул и состоит из энергии поступательного и вращательного движения молекул, а так же энергии колебательного движения атомов в самих молекулах.

Внутренняя потенциальная энергия обуславливается силами взаимодействия между молекулами и зависит от расстояния между ними.

Внутренняя энергия реального газ зависит от основных параметров газа:  $P$ ,  $v$  и  $T$ .

В идеальных газах силы взаимодействия между молекулами отсутствуют и поэтому внутренняя энергия идеального газа равно

внутренней кинетической энергии, и зависит только от температуры. Внутренняя энергия характеризует состояние газа, т.е. является параметром состояния. Внутренняя энергия  $1 \text{ кг}$  газа обозначается буквой  $u$  и в системе СИ измеряется в  $\text{Дж/кг}$ , во внесистемных единицах  $\text{ккал/кг}$ , между ними существует соотношение:

$$1 \text{ ккал/кг} = 4186,8 \text{ Дж/кг} = 4,19 \text{ кДж/кг}$$

В технической термодинамике определяется не абсолютное значение внутренней энергии, а ее изменение при переходе из одного состояния в другое. Обычно считают, что внутренняя энергия газа равна нулю при нормальных условиях, т.е. при  $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$  и при  $P = 760 \text{ мм.рт.ст.}$

Изменение внутренней энергии в дифференциальной форме определяется по формуле:

$$\int_1^2 du = u_2 - u_1, \quad (1.34)$$

где  $u_1$  и  $u_2$  – внутренняя энергия  $1 \text{ кг}$  газа в начальном и конечном состояниях.

### Работа расширения

Работа совершается только при изменении объема газа.

Элементарная работа расширения газа равна:

$$dl = P \cdot dv, \quad (1.35)$$

где  $P$  – абсолютное давление газа;

$dv$  – приращение объема в элементарном процессе.

Так как  $P$  – величина положительная, то  $dl$  и  $dv$  по знаку одинаковы. Поэтому  $dv > 0$ , то газ расширяется, тогда  $dl > 0$ , следовательно, работа расширения положительна. Если  $dv < 0$ , то газ сжимается, следовательно, работа сжатия – отрицательна. Произвольный процесс расширения 1-2 изображен на рис. 1.1.

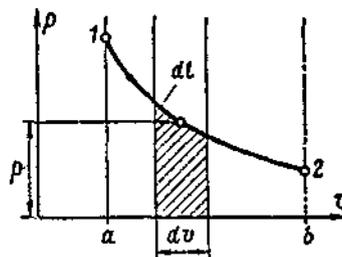


Рисунок 1.1 - Изображение работы газа в  $P, v$  – диаграмме.

Из графика видно, что при изменении объема газа на  $dv$  заштрихованная площадка с основанием  $dv$  и высотой  $P$  изображает элементарную работу. следовательно вся площадь  $a12b$ , равная бесконечно большому числу элементарных площадок изображает полную работу  $1 \text{ кг}$  газа в процессе 1-2; которая измеряется интегралом:

$$L = S_{a12b} = \int_1^2 P dv, \text{ кДж.} \quad (1.36)$$

### *Аналитическое выражение первого закона термодинамики..Энтальпия*

Если в произвольном процессе к  $1 \text{ кг}$  газа подвести извне теплоту  $q$ , то температура и объем газа будет увеличиваться. В результате повышения температуры и увеличения объема газа, его внутренняя энергия возрастает и при этом совершается работа расширения.

Полное изменение внутренней энергии равно:

$$\Delta u = u_2 - u_1, \text{ кДж}, \quad (1.37)$$

где  $u_1$  и  $u_2$  – внутренняя энергия в начале и конце процесса.

По закону сохранения энергии для рассматриваемого процесса баланс энергии выражается уравнением:

$$q = u_2 - u_1 + l, \text{ кДж/кг}. \quad (1.38)$$

Уравнение (1.38) является уравнением первого закона термодинамики для конечного процесса. Из уравнения следует, что подводимая теплота расходуется на изменение внутренней энергии газа и на совершение работы расширения.

Первый закон термодинамики можно выразить в дифференциальной форме:

$$dq = du + P \cdot dv. \quad (1.39)$$

В технической термодинамике подводимое к телу тепло считается положительным, отводимое – отрицательным: изменение внутренней энергии газа считается положительным при возрастании температуры газа и отрицательным при ее уменьшении.

Во многих тепловых расчетах используется величина  $i$ , называемая энтальпией, которая определяется из выражения:

$$i = u + Pv, \text{ кДж/кг} \quad (1.40)$$

Энтальпия является величиной, определяемой состояние тела, т.е. является параметром состояния. Для идеального газа внутренняя энергия  $u$ , произведение  $P \cdot v$ , равное  $RT$ , зависят только от температуры. Изменение энтальпии определяется только начальным и конечным состоянием газа, т.е. значениями температуры.

Выражение первого закона термодинамики можно выразить через энтальпию:

$$dq = di - v \cdot dP, \text{ кДж/кг}. \quad (1.41)$$

#### **Вопросы для самоконтроля**

1. Сформулировать первый закон термодинамики.
2. Пояснить физический смысл уравнения первого закона термодинамики, выраженного в математической форме.
3. Дать определение внутренней энергии газа.
4. От чего зависит изменение внутренней энергии.
5. Какая работа считается положительной, какая отрицательной?

6. Какая теплота считается положительной, какая отрицательной?
7. От чего зависит изменение энтальпии?
8. Охарактеризовать понятие энтальпии.
9. При изменении какого параметра можно определить совершается работа или нет?

Рекомендуемая литература:  
[ 1 с.22 ]; [ 2 с.50 ]

### Типовые задачи с решениями

#### Пример 5

Газ в количестве  $M$ , кг в результате изобарного подвода теплоты увеличивает температуру от  $t_1$  до  $t_2$  °C. Определить работу расширения, количество подведенной теплоты, изменение внутренней энергии и энтальпии, считая зависимость теплоемкости от температуры: а) нелинейной; б) линейной.

Решение:

Дано:

$$M_{CO_2} = 10 \text{ кг}$$

$$t_1 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 800 \text{ }^\circ\text{C}$$

1)  $C \rightarrow t$  – нелин.

2)  $C \rightarrow t$  – лин.

$$P = \text{const}$$

---


$$\Delta U - ?; Q - ?; L - ?; \Delta I - ?$$

А) *Нелинейная зависимость теплоемкости от температуры*

Определяем изменение внутренней энергии:

$$\Delta U = M \cdot C_{vm} \cdot (t_2 - t_1)$$

Для этого рассчитываем среднюю массовую теплоемкость при изохорном процессе:

$$C_{vm} = \frac{C_{vm} \Big|_0^{t_2} \cdot t_2 - C_{vm} \Big|_0^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1}$$

Берем значения теплоемкости из таблицы по таблице П2 (Приложение Б) при соответствующих температурах  $t_2$  и  $t_1$ :

$$C_{vm}(CO_2) \Big|_0^{100} = 0,6770 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}$$

$$C_{vm}(CO_2) \Big|_0^{800} = 0,8964 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}$$

Рассчитываем среднюю массовую теплоемкость при изохорном процессе:

$$C_{vm} = \frac{0,8964 \cdot 800 - 0,6770 \cdot 100}{700} = 0,92714 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}$$

Изменение внутренней энергии:

$$\Delta U = 10 \cdot 0,9274(800 - 100) = 6491,8 \text{ кДж}$$

Определим количество подведенной теплоты:

$$Q_p = M \cdot \Delta i = M \cdot C_{Pm} (t_2 - t_1)$$

Для этого определяем среднюю массовую теплоемкость газа при изобарном процессе

$$C_{Pm} = C_{Vm} + R$$

Газовую постоянную берем из таблицы А1 (Приложение А):

$$R(CO_2) = 188,9 \frac{\text{Дж}}{\text{кгК}}$$

$$C_{Pm} = 0,9277 + 188,9 \cdot 10^{-3} = 1,1166 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}$$

$$Q_p = 10 \cdot 1,1166 \cdot 700 = 7816,2 \text{кДж}$$

Энтальпия в изобарном процессе равна подводимой теплоте:

$$\Delta I = \Delta Q = M \cdot C_{Pm} (t_2 - t_1) = 7816,2 \text{кДж}$$

Работа расширения:

$$L = M \cdot R(t_2 - t_1) = P(V_2 - V_1)$$

$$L = 10 \cdot 0,1889 \cdot (700) = 1322,3 \text{кДж}$$

Б) *Линейная зависимость теплоемкости от температуры*

Определяем величины средних массовых теплоемкостей при изохорном и изобарном процессах по эмпирическим формулам:

$$C_{Vm} = 0,6837 + 0,00024053 \cdot t = 0,876124 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}$$

$$C_{Pm} = 0,8725 + 0,00024053 \cdot t = 1,064924 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}},$$

где  $C_{vm}$  и  $C_{Pm}$  – определяются по эмпирическим формулам, взятым из таблицы 1.3 для каждого газа соответствующего процесса ( $p = const$ ). В данные формулы вместо  $t$  подставляют сумму температур начала и конца процесса, т.е.  $t = t_1 + t_2$ .

Изменение внутренней энергии:

$$\Delta U = M \cdot C_{Vm} \cdot (t_2 - t_1)$$

$$\Delta U = 10 \cdot 700 \cdot 0,876124 = 6132,87 \text{кДж}$$

Количество подводимой теплоты:

$$Q_p = M \cdot \Delta i = M \cdot C_{Pm} (t_2 - t_1)$$

$$Q_p = 10 \cdot 1,064924 \cdot 700 = 7454,67 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}$$

Изменение энтальпии равно количеству подводимой теплоты:

$$\Delta I = \Delta Q = M \cdot C_{Pm} (t_2 - t_1) = 7454,67 \text{кДж}$$

Работу расширения:

$$L = M \cdot R(t_2 - t_1) = P(V_2 - V_1)$$

$$L = 10 \cdot 0,1889 \cdot 700 = 1322,3 \text{кДж}$$

### **Задача №8**

Сосуд емкостью 90 л содержит воздух при давлении 8 бар и температуре 30 °С. Определить количество тепла, которое необходимо сообщить воздуху, чтобы повысить его давление до 16 бар при постоянном объеме.

### **Тема 1.4 Исследование термодинамических процессов в газах P,v- и T,s - диаграммы**

Студент должен:

*Знать:* уравнения основных термодинамических процессов; зависимость между параметрами состояния газа для каждого процесса;

*уметь:* проводить анализ изменения состояния идеального газа в PV и TS-диаграммах.

#### *Вопросы темы*

Анализ основных термодинамических процессов изменения состояния идеальных газов: изохорного, изобарного, изотермического, адиабатного, политропного.

Уравнения основных термодинамических процессов, их изображение в P,v-диаграмме. Зависимость между параметрами состояния газа для каждого термодинамического процесса.

Уравнение первого закона термодинамики для каждого процесса.

### **Основные теоретические положения**

Основными термодинамическими процессами являются:

- процесс сообщения или отнятия тепла при постоянном объеме газа ( $v=\text{const}$ ) – изохорный процесс;
- процесс сообщения или отнятия тепла при постоянном давлении газа ( $P=\text{const}$ ) – изобарный процесс;
- процесс сообщения или отнятия тепла при постоянной температуре газа ( $T=\text{const}$ ) – изотермический процесс;
- процесс без сообщения или отнятия тепла извне ( $dq=0$ ) – адиабатный процесс;
- процесс, в котором изменение параметров подчиняется уравнению  $Pv^n = \text{const}$ , где  $n$  – величина постоянная для данного процесса – политропный процесс.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Уметь изображать в P,v-диаграмме изохорный, изобарный, изотермический и адиабатный процессы.
2. Формулы зависимости между параметрами состояния газа для каждого термодинамического процесса.

3. Уравнение первого закона термодинамики для каждого процесса.
4. Дать определение изохорного, изобарного, изотермического, адиабатного и политропного процессов.

Рекомендуемая литература:

[ 1 с.45]; [ 2 с.74 ]

### **Тема 1.5 Второй закон термодинамики. Энтропия. Круговые циклы. Циклы Карно.**

Студент должен:

*Знать:* сущность второго закона термодинамики; понятие о круговых процессах, прямых и обратных циклах, цикле Карно; понятие об энтропии;

*уметь:* производить термодинамический расчет циклов и определять их термический КПД, изображать циклы в PV и TS-диаграммах.

#### *Вопросы темы*

Второй закон термодинамики. Круговые процессы или циклы. Термический коэффициент полезного действия цикла, работа цикла, количество подведенной и отведенной в цикле теплоты.

Второй закон термодинамики для обратимых и необратимых процессов. Энтропия, ее физический смысл. T,s-диаграмма.

Понятие прямого и обратного цикла. Равновесное и неравновесное состояние рабочего тела. Обратимые и необратимые процессы и циклы. Идеальный цикл Карно, его изображения в P, v-диаграмме. Термический коэффициент полезного действия цикла Карно.

Изображение термодинамических процессов изменения состояния газа в циклах Карно в T,s- диаграмме.

### **Основные теоретические положения**

#### *Второй закон термодинамики. Энтропия*

Второй закон термодинамики определяет направление, в котором протекают процессы, устанавливает условия преобразования тепловой энергии в механическую, а также определяет максимальное значение работы, которая может быть произведена тепловым двигателем.

Второй закон термодинамики математически может быть выражен следующим образом:

$$dS \geq dQ / T,$$

где dS - бесконечно малое приращение энтропии системы, т.е. изменение;

dQ – бесконечно малое количество тепла, полученного системой от источника тепла;

T – абсолютная температура источника тепла.

Знак неравенства соответствует необратимым процессам, а знак равенства – обратимым. Следовательно, аналитическое выражение второго закона термодинамики для бесконечно малого обратимого процесса имеет вид

$$dQ = T \cdot dS$$

В данном уравнении величина  $T$  всегда положительна, поэтому  $dS$  и  $dq$  по знаку одинаковы. Значит, если в процессе теплота подводится, то энтропия газа увеличивается. Если в процессе теплота отводится, то энтропия газа уменьшается.

Основным уравнением для определения изменения энтропии в обратимом процессе является выражение

$$dS = dq / T,$$

где величина  $S$  – называется *энтропией*, которая представляет собой параметр состояния вещества. Особым свойством энтропии является то, что сумма ее небольших изменений по всему контуру произвольного обратимого цикла равна нулю. В технической термодинамике имеют дело не с абсолютным значением энтропии, а с ее изменением. Отсчет значения энтропии можно вести от любого состояния. Для газов принято считать значение энтропии равным нулю при нормальных условиях, т.е. при  $t=0$  °C и  $P=760$  мм рт ст.

Чтобы вычислить изменение энтропии в каком либо процессе необходимо из значения энтропии в конечном состоянии вычесть значение энтропии в начальном состоянии

$$\Delta S = S_2 - S_1$$

### *Круговые циклы*

Процессы, в которых рабочее тело, пройдя ряд различных состояний, возвращается в исходное состояние, называются *круговыми процессами*, или *циклами*. Циклы бывают *прямые* и *обратные*. Прямые циклы осуществляются в *тепловых машинах*, в которых теплота переходит в работу, а обратные – в холодильных установках, где работа переходит в теплоту.

Полезно использованная теплота в цикле определяется по формуле:

$$q = q_1 - q_2, \text{ кДж}$$

где  $q_1$  – теплота, подводимая к рабочему телу от горячего источника, кДж

$q_2$  – теплота, отдаваемая рабочим телом холодному источнику, кДж

В круговых циклах работа расширения считается положительной и обозначается  $l_1$ , работа сжатия считается отрицательной и обозначается  $l_2$ .

Полезная работа цикла  $l_{ц}$  равна разности работ расширения и сжатия

$$l_{ц} = l_1 - l_2, \text{ кДж}$$

Степень термодинамического совершенства прямого цикла характеризуется термическим коэффициентом полезного действия (к.п.д.), который представляет собой отношение работы цикла к подводимой теплоте и обозначается  $\eta_t$ , т.е

$$\eta_{\tau} = 1 - q_2 / q_1 = 1 - (q_2 / q_1)$$

### *Цикл Карно*

Прямой обратимый цикл Карно является идеальным циклом тепловых машин и осуществляется при наличии горячего источника постоянной температуры  $T_1$  и холодного источника постоянной температуры  $T_2$ .

Цикл состоит из двух изотермических и двух адиабатных процессов.

Термический к.п.д. цикла определяется по той же формуле, как и у кругового цикла.

Обратный цикл Карно состоит из тех же процессов, что и прямой, но изменение состояния газа происходит в обратном порядке.

Обратный цикл Карно является идеальным циклом *холодильных установок*.

Степень термодинамического совершенства обратного цикла характеризуется холодильным коэффициентом:

$$\varepsilon = q_2 / 1_{\tau}$$

Второй закон термодинамики можно сформулировать следующим образом:

1) В круговом процессе подводимая теплота не может быть полностью превращена в работу;

2) для превращения теплоты в работу необходим иметь не только нагреватель, но и холодильник с более низкой температурой. Т.е. необходим температурный перепад;

3) Теплота не может сама собой переходить от тел с низшей температурой к телам с более высокой температурой.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Какие процессы (циклы) называются круговыми.
2. Какие циклы называются прямыми и обратными.
3. Из каких термодинамических процессов состоит цикл Карно
4. Какие процессы (циклы) называются обратимыми и необратимыми.
5. Какое состояние тела называется равновесным и неравновесным.
6. Что собой представляет работа цикла, полезно используемая теплота.
7. Сформулировать второй закон термодинамики.
8. Охарактеризовать понятие энтропии.

Рекомендуемая литература:

[ 1 с.60 ]; [ 2 с.117 ]

### **Тема 1.6 Газовые циклы**

Студент должен:

*Знать:* циклы двигателей внутреннего сгорания (ДВС) и газотурбинных установок (ГТУ), определение их термического КПД при

различных способах подвода теплоты; *уметь*: проводить сравнение термических КПД циклов ДВС с различными способами подвода теплоты, строить в  $PV$  и  $TS$ -диаграммы циклов, проводить сравнение термических КПД циклов ГТУ.

### *Вопросы темы*

Двигатели внутреннего сгорания (ДВС). Циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания с подводом тепла при постоянном объеме и постоянном давлении со смешанным подводом тепла, их изображение в  $P, v$ - и  $T, s$ -диаграммах. Термический коэффициент полезного действия циклов двигателей внутреннего сгорания, их сравнение. Индикаторная диаграмма циклов.

Газотурбинная установка. Циклы газотурбинных установок (ГТУ) с подводом тепла при постоянном давлении и постоянном объеме, их изображение в  $P, v$ - и  $T, S$ -диаграммах.

Термический коэффициент полезного действия циклов, их сравнение. Цикл ГТУ с подводом тепла при постоянном объеме.

### **Основные теоретические положения**

Тепловые поршневые машины, использующих в качестве рабочих тел продукты сгорания жидких и газообразных топлив сжигаемых внутри цилиндра называют двигателями внутреннего сгорания.

В зависимости от способа подвода теплоты к рабочему телу циклы двигателей внутреннего сгорания (ДВС) сводятся к трем основным:

- 1) цикл с подводом теплоты при постоянном объеме;
- 2) цикл с подводом теплоты при постоянном давлении
- 3) цикл со смешанным подводом теплоты, в котором теплота сначала подводится при постоянном объеме, а затем – при постоянном давлении.

#### *Цикл с подводом тепла при постоянном объеме*

По данному циклу работают карбюраторные ДВС, использующие легкое топливо с низкой температурой воспламенения. В цилиндре двигателя происходит сжатие смеси парообразного топлива и воздуха. Зажигание горючей смеси осуществляется от электрической искры.

Цикл с подводом тепла при постоянном объеме состоит из двух адиабат и двух изохор. Графическое его изображение в  $P, V$ - и  $TS$  – координатах приведено на рисунках 1.2 и 1.3

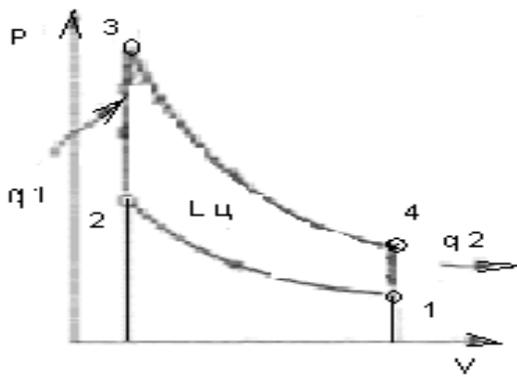


Рисунок 1.2 - P, V-диаграмма цикла ДВС с подводом теплоты при постоянном объеме.

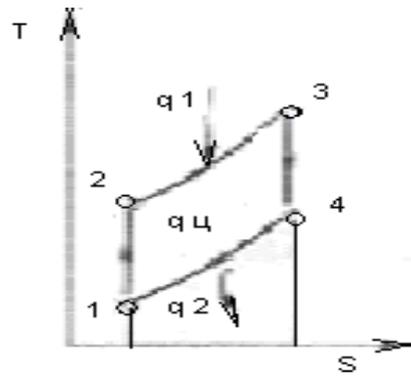


Рисунок 1.3 - TS -диаграмма цикла

При движении поршня справа налево, происходит адиабатное сжатие газа 1-2 и его объём уменьшается с  $V_1$  до  $V_2$ . Отношение начального объема  $V_1$  к конечному  $V_2$ . называется степенью сжатия и обозначается

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2}$$

Работа сжатия считается отрицательной.

В изохорном процессе 2-3 к газу подводится теплота  $q_1$  эквивалентная теплоте, выделяющейся при сгорании топлива, которая определяется по уравнению

$$q_1 = C_v(T_3 - T_2), \text{ кДж}$$

При обратном движении поршня справа налево, газ расширяется по адиабате 3-4 до объема  $V_4 = V_1$  при этом газ совершает положительную работу. *Результирующая работа цикла равна разности работ адиабатных процессов расширения и сжатия:*

$$l_{ц} = l_1 - l_2, \text{ кДж}$$

Количество отведенного тепла от газа в изохорном процессе 4-1, что соответствует его охлаждению в атмосфере равно:

$$q_2 = C_v(T_4 - T_1)$$

Полезно использованная теплота в цикле равна разности подводимой и отводимой теплот изохорных процессов

$$\eta_i = 1 - \frac{q_2}{q_1} \text{ или } \eta_i = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}}$$

Термический КПД цикла возрастает при увеличении сжатия  $\varepsilon$ .

Высокие степени двигателей работающих по данному циклу недопустимы т.к. температура к горючей смеси при сжатии может превысить температуру воспламенения и топливо загорится раньше, чем поршень придет в свое крайне положение. Это может привести к аварии.

Степень сжатия в этих двигателях зависят от свойств топлива и применяется от 4 до 8.

*Цикл с подводом тепла при постоянном давлении*

В двигателях, работающих по этому циклу (дизельных двигателях), подвергается сжатию только воздух, поступающий в цилиндр из атмосферы.

В целях повышения термического к.п.д. в этих двигателях применяются высокие степени сжатия  $\varepsilon=14-18$ . При последующем расширении сжатого воздуха в него через форсунку подается мелко распыленное жидкое топливо, оно воспламеняется и горит при постоянном давлении, что регулируется форсункой. Подача топлива происходит при перемещении поршня на некотором участке его хода, после чего происходит адиабатное расширение полученных продуктов сгорания.

Графическое его изображение в P,V- и TS – координатах приведено на рисунках 1.4 и 1.5

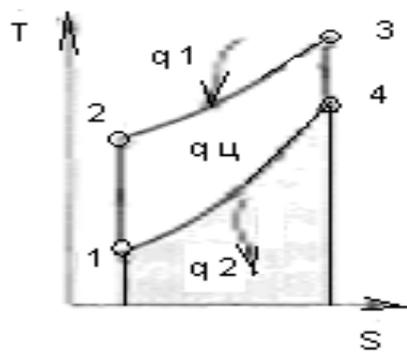
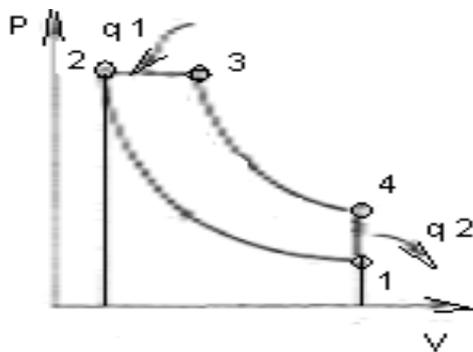


Рисунок 1.4 - P,V-диаграмма цикла ДВС с подводом теплоты при постоянном давлении.

Рисунок 1.5- TS -диаграмма цикла

Циклы с подводом теплоты при постоянном давлении состоит из двух адиабат одной изобары и одной изохоры.

Характеристикой цикла являются:

Степень сжатия в адиабатном процессе 1-2 , равная отношению:

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2}$$

Количество теплоты, подводимой в процессе изобарного расширения 2-3

$$q_1 = C_p (T_3 - T_2)$$

Работа цикла равна площади участка 1234 :

$$\ell_{\delta} = S_{1234} = q_1 - q_2 = q_{\delta}$$

Степень предварительного расширения  $\rho = \frac{V_3}{V_2} = \frac{T_3}{T_2}$

3-4 – адиабатное расширение рабочего тела;

4-1 - Изохорный отвода теплоты:

$$q_2 = C_v (T_4 - T_1)$$

Термический КПД цикла определяется по следующей формуле:

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} \quad \text{или}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{\rho^\kappa - 1}{\rho - 1} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{C_v(T_4 - T_1)}{C_p(T_3 - T_2)}$$

Из уравнения следует, что термический к.п.д. цикла тем выше, чем больше степень сжатия  $\varepsilon$  и чем меньше степень предварительного расширения  $\rho$ .

По данному циклу работают компрессорные двигатели внутреннего сгорания.

### Цикл со смешанным подводом тепла

Цикл со смешанным подводом тепла (цикл Тринклера) состоит из двух адиабат, двух изохор и одной изобары.

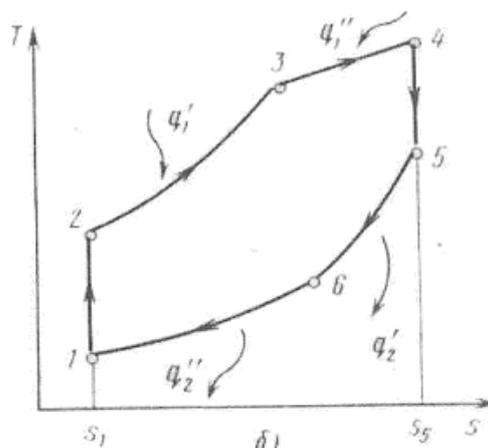
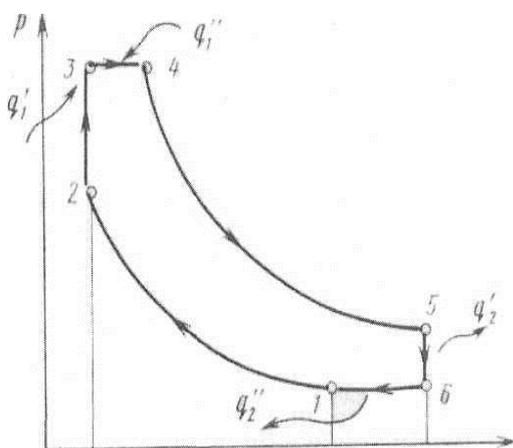


Рисунок 1.6 - P,V-диаграмма цикла ДВС со смешанным подводом теплоты

Рисунок 1.7- TS -диаграмма цикла

В цилиндре сжимается только чистый воздух, поэтому допускаются высокие степени сжатия

$$\varepsilon = 14 \div 18$$

Характеристика цикла является:

1-2 - адиабатный процесс сжатия воздуха

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2}$$

Изохорный процесс подвода

тепла 2-3 соответствует горению части топлива и сопровождается повышением давления. Количество подводимой теплоты  $q_1' = C_v(T_3 - T_2)$

Отношение давления  $P_3$  к  $P_2$  называемой степенью повышения давления:

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

3-4 - изобарный процесс подвода теплоты, который соответствует горению другой основной части топлива:

$$q_1'' = C_p(T_4 - T_3)$$

Степень предварительного расширения в процессе 3 – 4:

$$\rho = \frac{V_4}{V_3} = \frac{T_4}{T_3}$$

4-5 - адиабатный процесс расширения продуктов горения.

Процесс 5,1 – это изохорный процесс отвода теплоты, соответствует охлаждению отработавших газов в атмосфере.

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

Термический КПД цикла определяется:

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} \quad \text{или}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1' + q_1''} = 1 - \frac{C_v(T_5 - T_1)}{C_v(T_3 - T_2) + C_p(T_4 - T_3)}$$

Окончательно:

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

Следовательно, термический к.п.д. цикла повышается с увеличением степени сжатия  $\varepsilon$  и степени повышения давления  $\lambda$  и сжатия при увеличении степени предварительного расширения  $\rho$ . При сравнении экономичности циклов при одинаковых степенях сжатия  $\varepsilon$  и количества отведенной теплоты  $q_2$  соотношение между КПД различных циклов следующее.

$$\eta_t^{V=const} > \eta_t^{n \neq \infty} > \eta_t^{P=const}$$

Наиболее экономичным считается цикл при изохорном подводе тепла.

### *Циклы газотурбинных установок*

Газотурбинные установки (ГТУ) по сравнению с поршневыми ДВС обладают существенными преимуществами, что способствует их внедрению в различные отрасли народного хозяйства в качестве энергетических установок.

Эти установки могут выполняться быстроходными и обладать большой мощностью при малых габаритах.

Работа газотурбинных установок характеризуется непрерывностью во всех элементах.

Расширение рабочего тела в газовой турбине происходит до атмосферного давления, что обеспечивает более высокие к.п.д. циклов, чем в поршневых двигателях.

### **Пример 6**

Рассчитать цикл ДВС 1-2-3-4 с подводом теплоты при  $V = const$  по данным:  $P_1 = 0.1$  Мпа,  $t_1 = 27^\circ\text{C}$ , степень сжатия  $\varepsilon = 4$ , степень повышения

давления  $\lambda = 1.5$ . Рабочее тело обладает свойствами воздуха, теплоемкость постоянная, количество газа 1 кг.

Решение:

- 1) Начальный объем:

$$V_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{287 \cdot 300}{0.1 \cdot 10^6} = 0.86 \text{ м}^3 / \text{кг}$$

- 2) Конечный объем:

$$V_2 = \frac{V_1}{E} = \frac{0.86}{4} = 0.215 \text{ м}^3 / \text{кг}$$

- 3) Давление в т.2:

$$P_2 = P_1 \cdot \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^k = 0.1 \cdot 4^{1.4} = 0.698 \text{ МПа}$$

- 4) Температура в т.2:

$$T_2 = \frac{P_2 \cdot V_2}{R} = \frac{0.698 \cdot 10^6 \cdot 0.215}{287} = 524 \text{ К}$$

- 5) Давление в т.3:

$$P_3 = \lambda \cdot P_2 = 1.5 \cdot 0.698 = 1.047 \text{ МПа}$$

- 6) Температура в т.3:

$$T_3 = \lambda \cdot T_2 = 1.5 \cdot 524 = 786 \text{ К}$$

- 7) Давление в т.4:

$$P_4 = \frac{P_3}{\left( \frac{V_4}{V_3} \right)^k} = \frac{1.047}{4^{1.4}} = 0.15 \text{ МПа}$$

- 8) Температура в т.4:

$$T_4 = T_1 \cdot \frac{P_4}{P_1} = 300 \cdot \frac{0.15}{0.1} = 450 \text{ К}$$

- 9) Массовая теплоемкость:

$$C_v = \frac{\mu C_v}{\mu} = \frac{20.55}{28.95} = 0.723 \text{ КДж} / \text{кг К}$$

- 10) Количество подведенной теплоты:

$$q_1 = C_v \cdot (T_3 - T_2) = 0.723 \cdot (786 - 524) = 189.6 \text{ КДж} / \text{кг}$$

- 11) Количество отведенной теплоты:

$$q_2 = C_v \cdot (T_1 - T_4) = 0.723 \cdot (300 - 450) = -108 \text{ КДж} / \text{кг}$$

- 12) Термический КПД цикла:

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{108.3}{189.5} = 0.43$$

### Вопросы для самоконтроля

1. Дать определение двигателя внутреннего сгорания.
2. Какие компрессоры называются одноступенчатые и многоступенчатые

3. Изобразить циклы ДВС в  $P,V$  и  $T,S$ -диаграммах при различных способах подвода теплоты.
4. Изобразить циклы ГТУ в  $P,V$  и  $T,S$ -диаграммах при различных способах подвода теплоты.
5. Определение термического коэффициента полезного действия циклов ДВС и ГТУ.
6. Пояснить принцип работы компрессора.
7. Пояснить принцип работы газотурбинных установок (ГТУ).
8. Что собой представляет индикаторная диаграмма циклов ДВС.

Рекомендуемая литература:

[ 1 с.75 ]; [ 2 с.137 ].

### Задача 9 (Варианты 1-16)

Построить  $P,V$  – и  $T,S$  – диаграммы цикла двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при постоянном объеме. С помощью диаграмм рассчитать цикл ДВС по данным: давление  $P_1$ , МПа; начальная температура  $t_1$  °С; степень сжатия  $\varepsilon$ ; степень повышения давления  $\lambda$ ; газовая постоянная  $R$ , кДж/кгК; коэффициент адиабаты  $k$ ; теплоемкость газа считать постоянной, количество газа 1кг.

Таблица 1.4-Данные к задаче 9

Вариант	Рабочее тело	$P_1$ , МПа	$t_1$ °С	$\varepsilon$	$\lambda$	$R$ , кДж/кгК	$k$
1	CO <sub>2</sub>	0,2	28	4	1,2	188,9	1,29
2	CO <sub>2</sub>	0,4	30	7	1,3	188,9	1,29
3	CO <sub>2</sub>	0,6	32	5	1,4	188,9	1,29
4	CO	0,3	35	4	1,5	296,8	1,4
5	CO	0,5	29	5	1,5	296,8	1,4
6	CO	0,7	29	6	1,3	296,8	1,4
7	CO	0,8	33	7	1,3	296,8	1,4
8	воздух	0,9	34	8	1,5	287	1,4
9	воздух	0,2	36	4	1,3	287	1,4
10	воздух	0,6	26	5	1,4	287	1,4
11	воздух	0,6	26	6	1,4	287	1,4
12	CO <sub>2</sub>	0,6	26	7	1,4	287	1,29
13	CO <sub>2</sub>	0,6	26	6	1,4	287	1,29
14	CO <sub>2</sub>	0,6	26	8	1,4	287	1,29
15	CO <sub>2</sub>	0,6	26	6	1,4	287	1,29
16	воздух	0,5	28	4	1,4	287	1,4

# Практическая работа 1

## Расчет теплоемкости газов и газовых смесей

**Цель работы.** Закрепление практических навыков при определении теплоемкости газовых смесей.

### Теоретическая часть

Удельной теплоемкостью или теплоемкостью называется количество теплоты, которое необходимо сообщить единице количества газа для изменения его температуры на  $1\text{ }^\circ\text{C}$  в данном процессе.

В зависимости от единицы количества газа теплоемкости могут быть массовые  $c$ , объемные  $c'$  и мольные  $\mu c$  между которыми существуют следующие соотношения:

$$c = c' \nu_H = \frac{\mu c}{\mu}, \quad (1.1)$$

или

$$c' = c \rho_H = \frac{\mu c}{22,4}, \quad (1.2)$$

где  $\nu_H$ ,  $\rho_H$ ,  $22,4$  – соответственно удельный объем, плотность и объем одного киломоля газа при нормальных условиях.

Истинной теплоемкостью называется отношение количества тепла  $dq$ , сообщенное в элементарном процессе  $1\text{ кг}$  газа, к бесконечно малому изменению температуры  $dt$ :  $c = \frac{dq}{dt}$

Средней теплоемкостью  $C_m$  называется количество тепла, которое в среднем расходуется в процессе нагревания  $1\text{ кг}$  газа на

$1\text{ }^\circ\text{C}$  в интервале температур от  $t_1$  до  $t_2$ :

$$C_m = \frac{q}{t_2 - t_1}. \quad (1.3)$$

Различают изохорную и изобарную теплоемкость:

– теплоемкость газа в изохорном процессе  $\nu = const$  называется изохорной и обозначается:  $c_\nu$  - массовая,  $c_\nu'$  - объемная и  $\mu c_\nu$  – мольная;

– теплоемкость газа в изобарном процессе  $P = const$  называется изобарной и обозначается:  $c_P$  - массовая,  $c_P'$  - объемная и  $\mu c_P$  – мольная

Между мольными теплоемкостями при постоянном давлении и объеме существует следующая зависимость:

$$\mu c_P - \mu c_\nu = \mu R \approx 8,314, \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}} \quad (1.4)$$

Между массовыми теплоемкостями существует следующая зависимость (уровнение Майера):

$$c_P = c_\nu + R, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}. \quad (1.5)$$

Между изобарными и изохорными существует зависимость, которая носит название, показателя адиабаты и обозначается  $\kappa$ :

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} = \frac{c_p'}{c_v'} = \frac{\mu c_p}{\mu c_v} = 1 + \frac{R}{c_v} \quad (1.6)$$

Численное значение  $\kappa$  – находится из соотношения мольных теплоемкостей взятых из таблиц:

- для одноатомных газов  $\kappa = 1,67$ ;
- для двухатомных газов  $\kappa = 1,4$ ;
- для трехатомных газов  $\kappa = 1,29$ .

### Зависимость теплоемкости газов от температуры

Теплоемкость всех газов кроме одноатомных с повышением температуры увеличивается. В небольшом температурном интервале для двух, реже трехатомных газов зависимость теплоемкости от температуры принимается линейной и выражается уравнением вида:

$$c = a + bt, \quad (1.7)$$

где  $a$  – значение теплоемкости при  $t = 0$  °С;

$b$  – постоянный коэффициент, характеризующий скорость возрастания теплоемкости с повышением температуры.

Определяют среднюю линейную теплоемкость по интерполяционным формулам для каждого отдельного газа таблица Г1 (Приложение Г) по этим формулам вместо  $t$  нужно подставлять сумму температур ( $t_1 + t_2$ ) начала и конца процесса.

Более точные значения средней теплоемкости получаются при учете ее нелинейной зависимости от температуры, вычисляемой по формуле:

$$c_m \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{c_m \Big|_{0}^{t_2} - c_m \Big|_{0}^{t_1}}{t_2 - t_1}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \quad (1.8)$$

где  $c_m \Big|_{0}^{t_2}$  и  $c_m \Big|_{0}^{t_1}$  – средние нелинейные теплоемкости от 0 °С до  $t_2$  и от 0 °С до  $t_1$ , которые берутся из таблиц П1 – П4 (Приложение Б).

Аналогичными являются формулы для определения объемных и мольных теплоемкостей.

### Теплоемкость смеси газов

При задании смеси массовыми долями массовая теплоемкость смеси определяются по формуле:

$$c_{см} = m_1 c_1 + m_2 c_2 + \dots + m_n c_n, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \quad (1.9)$$

где  $m_1 c_1$ ;  $m_n c_n$  – произведения массовой доли на массовую теплоемкость каждого газа входящего в смесь в данном процессе.

При задании смеси объемными долями объемная теплоемкость смеси находится:

$$c'_{cm} = r_1 c'_1 + r_2 c'_2 + \dots + r_n c'_n, \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}, \quad (1.10)$$

где  $r_n c'_n$  – произведение объемной доли на объемную теплоемкость каждого газа входящего в смесь.

Мольная теплоемкость:

$$\mu c_{cm} = \sum_1^n r_n \cdot \mu c_n, \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}} \quad (1.11)$$

Для вычисления количества тепла, которое необходимо затратить в процессе нагревания  $l$  кг газа в интервале температур от  $t_1$  °C до  $t_2$  пользуются формулой:

$$q = c_m \int_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) = c_{m2} t_2 - c_{m1} t_1, \quad (1.12)$$

где  $c_{m1}$  и  $c_{m2}$  – соответственно средние теплоемкости в пределах от 0 °C до  $t_1$  и от 0 °C до  $t_2$ .

В изохорном процессе  $v = const$  количество тепла, затрачиваемое в процессе, будет вычисляться:

$$q_v = C_v m_2 \cdot t_2 - C_v m_1 \cdot t_1, \quad (1.13)$$

в изобарном соответственно:

$$q_p = C_p m_2 \cdot t_2 - C_p m_1 \cdot t_1. \quad (1.14)$$

Если в процессе участвуют  $M$  кг или  $V_H$  м<sup>3</sup> газа, то подсчет тепла производится по формулам:

$$Q_v = M(c_{vm2} \cdot t_2 - c_{vm1} \cdot t_1) = V_H (c'_{vm2} \cdot t_2 - c'_{vm1} \cdot t_1) \quad (1.15)$$

$$Q_p = M(c_{pm2} \cdot t_2 - c_{pm1} \cdot t_1) = V_H (c'_{pm2} \cdot t_2 - c'_{pm1} \cdot t_1) \quad (1.16)$$

## Задание

### Вариант 1-16

Смесь газов имеет массовый состав:  $M_1; M_2; M_3$ . Определить молекулярную массу смеси  $\mu_{cm}$ ; газовую постоянную смеси  $R_{cm}$ , парциальные давления компонентов, входящих в смесь при заданном давлении смеси  $P_{cm}$ , удельный объем смеси, и среднюю массовую теплоемкость заданной смеси при изобарном и изохорном нагревании от  $t_1$  до  $t_2$ , считая зависимость теплоемкости от температуры нелинейной.

Молекулярные массы; плотности и объемы киломолей при нормальных условиях и газовые постоянные газов приведены в таблице А1(Приложение А). В таблице 1.2 приведены формулы для расчета газовых смесей.

Средние массовые теплоемкости для различных газов при нелинейной зависимости теплоемкости от температуры, в изобарном ( $P = const$ ) и изохорном ( $v = const$ ) процессах принимаются по таблицам П1; П2 (Приложение Б). Данные для расчета указаны в таблице 1.1

### Порядок расчета

1 Переводим процентное содержание отдельных газов, входящих в смесь в численные значения массовых долей.

Например:

Массовый состав смеси составляет 21% - O<sub>2</sub> и 79% - N<sub>2</sub>.

Массовый состав кислорода – 21% составляет в единице массы газа – 0,21 часть массовой доли, а азот составляет 0,79 часть.

2 По таблице А1 берем значения молекулярной массы, плотности и газовые постоянные для каждого газа входящего в смесь.

3 Определяем исходные параметры смеси, если смесь задана массовыми долями по следующим формулам.

Удельный объем смеси:

$$v_{CM} = \sum_1^n \frac{m_i}{\rho_i} = \frac{m_1}{\rho_1} + \frac{m_2}{\rho_2} + \dots + \frac{m_n}{\rho_n}, \frac{M^3}{кг} \quad (1.17)$$

Плотность смеси:

$$\rho_{CM} = \frac{I}{\sum_1^n \frac{m_i}{\rho_i}} = \frac{I}{\frac{m_1}{\rho_1} + \frac{m_2}{\rho_2} + \dots + \frac{m_n}{\rho_n}}, \frac{кг}{M^3} \quad (1.18)$$

Кажущаяся молекулярная масса смеси:

$$\mu_{CM} = \frac{I}{\sum_1^n \frac{m_i}{\mu_i}} = \frac{I}{\frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2} + \dots + \frac{m_n}{\mu_n}} \quad (1.19)$$

Газовая постоянная смеси:

$$R_{CM} = \sum_1^n m_i R_i = m_1 R_1 + m_2 R_2 + \dots + m_n R_n, \frac{Дж}{кг \cdot ^\circ K} \quad (1.20)$$

Парциальное давление каждого газа:

$$P_i = m_i \frac{R_i}{R_{CM}} \cdot P, \text{ мм.рт.ст.} \quad (1.21)$$

4 Определяем среднюю массовую теплоемкость газовой смеси в изобарном процессе:

$$C_{Pm(CM)} = \sum_1^n m_i C_{Pmi} = m_1 C_{Pm1} + m_2 C_{Pm2} + \dots + m_n C_{Pmn}, \frac{Дж}{кг \cdot ^\circ K}, \quad (1.22)$$

где  $C_{Pmi} = \frac{C_{Pm0}^{t_2} \cdot t_2 - C_{Pm0}^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1}$  – средняя массовая теплоемкость каждого

отдельного газа, входящего в смесь при заданном интервале  $t_1$  и  $t_2$  берем из таблицы П1 (Приложение Б);

$m_1; m_2; m_n$  – массовая доля каждого отдельного газа, входящего в смесь.

5 Средняя массовая теплоемкость в изохорном процессе определяется по формуле:

$$C_{vm(CM)} = \sum_1^n m_i C_{vmi} = m_1 C_{vm1} + m_2 C_{vm2} + \dots + m_n C_{vnn}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{К}}, \quad (1.23)$$

где  $C_{vmi} = \frac{C_{vm0}^{t_2} \cdot t_2 - C_{vm0}^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1}$  — средняя массовая теплоемкость каждого

отдельного газа, входящего в смесь при изохорном процессе в заданном интервале  $t_1$  и  $t_2$  берем из таблицы В2 (Приложение В).

Таблица 1.1-Расчетные данные к вариантам 1-16

№ вариан т	Заданный состав смеси	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$P_{CM}$ мм.рт .ст	$t_1$ $^\circ\text{C}$	$t_2$ $^\circ\text{C}$
1	массовыми долями	O <sub>2</sub> 5%	CO	N <sub>2</sub> 20%	760	100	150
2	— « —	O <sub>2</sub> 10%	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub> 70%	760	0	100
3	— « —	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> 60%	N <sub>2</sub> 30%	750	150	450
4	— « —	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O 5%	CO 60%	750	0	250
5	— « —	воздух 50%	CO	N <sub>2</sub> 10%	740	100	600
6	— « —	CO <sub>2</sub> 15%	H <sub>2</sub> O 20%	N <sub>2</sub>	740	100	500
7	— « —	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> 40%	N <sub>2</sub> 5%	750	50	650
8	— « —	O <sub>2</sub> 16%	H <sub>2</sub> O 30%	CO <sub>2</sub>	760	0	400
9	— « —	O <sub>2</sub> 15%	CO 68%	N <sub>2</sub>	740	100	700
10	— « —	воздух 25%	O <sub>2</sub> 45%	N <sub>2</sub>	740	120	800
11	— « —	CO <sub>2</sub> 15%	N <sub>2</sub> 40%	O <sub>2</sub>	760	10	550
12	— « —	CO <sub>2</sub> 16%	H <sub>2</sub> O	O <sub>2</sub> 28%	750	200	600
13	— « —	CO 30%	N <sub>2</sub> 45%	O <sub>2</sub>	770	200	500
14	— « —	O <sub>2</sub> 20%	воздух	N <sub>2</sub> 29%	770	150	400
15	— « —	воздух 44%	CO <sub>2</sub> 16%	O <sub>2</sub>	760	250	800
16	— « —	O <sub>2</sub> 42%	N <sub>2</sub> 1 18%	H <sub>2</sub> O	750	0	300

Таблица 1.2- Формулы для расчета газовых смесей

Задание состава смеси	Плотность и удельный объем смеси	Кажущаяся молекулярная масса смеси	Газовая постоянная смеси	Парциальное давление
Массовыми долями	$v_{CM} = \sum_1^n \frac{m_i}{\rho_i}$ $\rho_{CM} = \frac{1}{\sum_1^n \frac{m_i}{\rho_i}}$	$\mu_{CM} = \frac{1}{\sum_1^n \frac{m_i}{\mu_i}}$	$R_{CM} = \sum_1^n m_i R_i$	$p_i = m_i \cdot \frac{R_i}{R_{CM}} p$
Объемными долями	$\rho_{CM} = \sum_1^n r_i \rho_i$ $v_{CM} = \frac{1}{\sum_1^n r_i \rho_i}$	$\mu_{CM} = \sum_1^n r_i \mu_i$	$R_{CM} = \frac{8314}{\sum_1^n r_i \mu_i}$	$p_i = r_i p$

Таблица 1.3 - Интерполяционные формулы для средних массовых и объемных теплоемкостей газов при линейной зависимости теплоемкости от температуры

Газ	Массовая теплоемкость, кДж/(кг К)	Объемная теплоемкость, кДж/(м <sup>3</sup> К)
<i>В пределах от 0 до 1000<sup>0</sup>С</i>		
O <sub>2</sub>	$c_{рт} = 0,9127 + 0,00012724 t$ $c_{вт} = 0,6527 + 0,00012724 t$	$c'_{рт} = 1,3046 + 0,00018183 t$ $c'_{вт} = 0,9337 + 0,00018183 t$
N <sub>2</sub>	$c_{рт} = 1,0258 + 0,00008382 t$ $c_{вт} = 0,7289 + 0,00008382 t$	$c'_{рт} = 1,2833 + 0,00010492 t$ $c'_{вт} = 0,9123 + 0,00010492 t$
CO	$c_{рт} = 1,0304 + 0,00009575 t$ $c_{вт} = 0,7335 + 0,00009575 t$	$c'_{рт} = 1,2883 + 0,00011966 t$ $c'_{вт} = 0,9173 + 0,00011966 t$
Воздух	$c_{рт} = 0,9952 + 0,00009349 t$ $c_{вт} = 0,7084 + 0,00009349 t$	$c'_{рт} = 1,2870 + 0,00012091 t$ $c'_{вт} = 0,9161 + 0,00012091 t$
H <sub>2</sub> O	$c_{рт} = 1,8041 + 0,00029278 t$ $c_{вт} = 1,3783 + 0,00029278 t$	$c'_{рт} = 1,4800 + 0,00023551 t$ $c'_{вт} = 1,1091 + 0,00023551 t$
S <sub>2</sub> O	$c_{рт} = 0,6314 + 0,00015541 t$ $c_{вт} = 0,5016 + 0,00015541 t$	$c'_{рт} = 1,8472 + 0,00004547 t$ $c'_{вт} = 1,4763 + 0,00004547 t$
<i>В пределах от 0 до 1500<sup>0</sup>С</i>		
H <sub>2</sub>	$c_{рт} = 14,2494 + 0,00059574 t$ $c_{вт} = 10,1241 + 0,00059574 t$	$c'_{рт} = 1,2803 + 0,00005355 t$ $c'_{вт} = 0,9094 + 0,00005355 t$
CO <sub>2</sub>	$c_{рт} = 0,8725 + 0,00024053 t$ $c_{вт} = 0,6837 + 0,00024053 t$	$c'_{рт} = 1,7250 + 0,00004756 t$ $c'_{вт} = 1,3540 + 0,00004756 t$

Рекомендуемая литература:

[ 1 с.32 ]; [2 с.39 ]

## **Контрольные задания по дисциплине Основы термодинамики**

### **Вариант 1**

- 1 Задача №1 .Тема 1.1
- 2 Задача №6. Тема 1.2
- 3 Задача №9.Тема 1.6

### **Вариант 2**

- 1 Задача №2 .Тема 1.1
- 2 Задача №7. Тема 1.2
- 3 Задача №9.Тема 1.6

### **Вариант 3**

- 1 Задача №3 .Тема 1.1
- 2 Задача №8. Тема 1.3
- 3 Задача №9.Тема 1.6

### **Вариант 4**

- 1 Задача №4 .Тема 1.1
- 2 Задача №6. Тема 1.2
- 3 Задача №9.Тема 1.6

### **Вариант 5**

- 1 Задача №5 .Тема 1.1
- 2 Задача №7. Тема 1.2
- 3 Задача №9.Тема 1.6

### **Вариант 6**

- 1 Задача №1 .Тема 1.1
- 2 Задача №8. Тема 1.3
- 3 Задача №9.Тема 1.6

### **Вариант 7**

- 1 Задача №2 .Тема 1.1
- 2 Задача №6. Тема 1.2
- 3 Задача №9.Тема 1.6

### **Вариант 8**

- 1 Задача №3 .Тема 1.1
- 2 Задача №7. Тема 1.2
- 3 Задача №9.Тема 1.6

### **Вариант 9**

- 1 Задача №4 .Тема 1.1

- 2 Задача №8. Тема 1.3
- 3 Задача №9.Тема 1.6

**Вариант 10**

- 1 Задача №5 .Тема 1.1
- 2 Задача №6. Тема 1.2
- 3 Задача №9.Тема 1.6

**Вариант 11**

- 1 Задача №1 .Тема 1.1
- 2 Задача №7. Тема 1.2
- 3 Задача №9.Тема 1.6

**Вариант 12**

- 1 Задача №2 .Тема 1.1
- 2 Задача №8. Тема 1.3
- 3 Задача №9.Тема 1.6
- 6 Задача №15. Тема 1.8

**Вариант 13**

- 1 Задача №3 .Тема 1.1
- 2 Задача №6. Тема 1.2
- 3 Задача №9.Тема 1.6

**Вариант 14**

- 1 Задача №4 .Тема 1.1
- 2 Задача №7. Тема 1.2
- 3 Задача №9.Тема 1.6

**Вариант 15**

- 1 Задача №5 .Тема 1.1
- 2 Задача №8. Тема 1.3
- 3 Задача №9.Тема 1.6

**Вариант 16**

- 1 Задача №1 .Тема 1.1
- 2 Задача №6. Тема 1.2
- 3 Задача №9.Тема 1.6

## Список рекомендуемой литературы

### Основные источники:

- 1 Смирнова М.В. Теоретические основы теплотехники. - Волгоград: ИД «Ин-Фолио», 2015 г. - 272 с.: ил.
- 2 Прибытков И.А., Левицкий И.А. Теоретические основы теплотехники. - М.:Академия, 2015 г. - 680 с.: ил.
- 3 Брюханов О.Н., Мелик-Аракелян А.Т., Коробко В.И. Основы гидравлики и теплотехники -4-е изд., стер.-М.:Издательский центр «Академия», 2015-240 с.

### Дополнительные источники:

- 1 Костерев Ф.М., Кушнырев В.И. Теоретические основы теплотехники. – М.: Энергия, 2013. - 360 с.: ил.
- 2 Рабинович О.М. Сборник задач по технической термодинамике.- М.: машиностроение, 2013 г. - 376 с.: ил.
- 3 Черняк О.В. Основы теплотехники и гидравлики. - М.: Высшая школа, 2013 г. - 287 с.: ил.
- 4 Теплотехника под редакцией Н.Н. Сушкина - М.:

Приложение А

Таблица А1 - Молекулярные массы, плотности и объемы киломолей при нормальных условиях и газовые постоянные важнейших газов

Вещество	Химическое обозначение	Молекулярная масса $\mu$	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Объем Киломоля $\mu$ , м <sup>3</sup> /кг	Газовая постоянная, КДж/(кгК)
Воздух	-	28,96	1,293	22,40	287,0
Кислород	O <sub>2</sub>	32,00	1,429	22,39	259,8
Азот	N <sub>2</sub>	28,026	1,251	22,40	296,8
Атмосферный азот	N <sub>2</sub>	28,16	(1,257)	(22,40)	(295,3)
Гелий	He	4,03	0,179	22,42	2078,0
Аргон	Ar	39,994	1,783	22,39	208,2
Водород	H <sub>2</sub>	2,016	0,090	22,43	4124,0
Оксись углерода	CO	28,01	1,250	22,40	296,8
Двуокись углерода	CO <sub>2</sub>	44,01	1,977	22,26	188,9
Сернистый газ	SO <sub>2</sub>	64,06	2,926	21,89	129,8
Метан	CH <sub>4</sub>	16,032	0,717	22,39	518,8
Этилен	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28,052	1,251	22,41	296,6
Коксовый газ	-	11,50	0,515	22,33	721,0
Аммиак	NH <sub>3</sub>	17,032	0,771	22,08	488,3
Водяной пар	H <sub>2</sub> O	18,016	(0,804)	(22,40)	(461)

Приложение Б

Таблица П1-Средняя массовая теплоемкость газов при постоянном давлении от 0<sup>0</sup>С до t<sup>0</sup>С  $c_{рт}$ , кДж/(кг К)

$t, ^\circ\text{C}$	$O_2$	$N_2$	$CO$	$CO_2$	$H_2O$	Воздух	$H_2$	$SO_2$
0	0,9148	1,0392	1,0396	0,8148	1,8594	1,0036	14,195	0,607
100	0,9232	1,0404	1,0417	0,8658	1,8728	1,0061	14,353	0,636
200	0,9353	1,0434	1,0463	0,9102	1,8937	1,0115	14,421	0,662
300	0,9500	1,0488	1,0538	0,9487	1,9192	1,0191	14,446	0,687
400	0,9651	1,0567	1,0634	0,9877	1,9477	1,0283	14,477	0,708
500	0,9793	1,0660	1,0748	1,0128	1,9778	1,0387	14,509	0,724
600	0,9927	1,0760	1,0861	1,0396	2,0092	1,0496	14,542	0,737
700	1,0048	1,0869	1,0978	1,0639	2,0419	1,0605	14,587	0,754
800	1,0157	1,0974	1,1091	1,0852	2,0754	1,0710	14,461	0,762
900	1,0258	1,1078	1,1200	1,1045	2,1097	1,0815	14,706	0,775
1000	1,0350	1,1179	1,1304	1,1225	2,1436	1,0907	14,776	0,783
1100	1,0434	1,1271	1,1401	1,1384	2,1771	1,0999	14,853	0,791
1200	1,0509	1,1359	1,1493	1,1530	2,2106	1,1082	14,934	0,795
1300	1,0580	1,1447	1,1577	1,1660	2,2429	1,1166	15,023	
1400	1,0647	1,1526	1,1656	1,1782	2,2743	1,1242	15,113	
1500	1,0714	1,1602	1,1731	1,1895	2,3048	1,1313	15,202	
1600	1,0773	1,1673	1,1798	1,1995	2,3346	1,1380	15,294	
1700	1,0831	1,1736	1,1865	1,2091	2,3630	1,1443	15,383	
1800	1,0886	1,1798	1,1924	1,2179	2,3907	1,1501	15,472	
1900	1,0940	1,1857	1,1983	1,2259	2,4166	1,1560	15,561	
2000	1,0990	1,1911	1,2033	1,2334	2,4422	1,1610	15,649	
2100	1,1041	1,1966	1,2083	1,2405	2,4664	1,1664	15,736	
2200	1,1087	1,2012	1,2129	1,2468	2,4895	1,1710	15,819	
2300	1,1137	1,2058	1,2175	1,2531	2,5121	1,1757	15,902	
2400	1,1183	1,2104	1,2217	1,2586	2,5334	1,1803	15,983	
2500	1,1229	1,2142	1,2259	1,2636	2,5544	1,1840	16,064	

Таблица П2 - Средняя массовая теплоемкость газов при постоянном объеме от 0°С до t°С  $c_{\text{вт}}$ , кДж/(кг К)

$t, ^\circ\text{C}$	$O_2$	$N_2$	$CO$	$CO_2$	$H_2O$	<i>Воздух</i>	$H_2$	$SO_2$
0	0,6548	0,7423	0,7437	0,6259	1,3980	0,7164	10,071	0,477
100	0,6632	0,7427	0,7448	0,6770	1,4114	0,7163	10,228	0,507
200	0,6753	0,7465	0,7494	0,7214	1,4323	0,7243	10,297	0,532
300	0,6900	0,7519	0,7570	0,7593	1,4574	0,7319	10,322	0,557
400	0,7051	0,7599	0,7666	0,7938	1,4863	0,7415	10,353	0,578
500	0,7193	0,7691	0,7775	0,8240	1,5160	0,7519	10,384	0,595
600	0,7327	0,7792	0,7892	0,8508	1,5474	0,7624	10,417	0,607
700	0,7448	0,7900	0,8009	0,8646	1,5805	0,7733	10,463	0,624
800	0,7557	0,8005	0,8122	0,8964	1,6140	0,7842	10,517	0,632
900	0,7658	0,8110	0,8231	0,9157	1,6483	0,7942	10,581	0,345
1000	0,7750	0,8210	0,8336	0,9332	1,8823	0,8039	10,652	0,653
1100	0,7834	0,8302	0,8432	0,9496	1,7158	0,8127	10,727	0,662
1200	0,7913	0,8395	0,8566	0,9638	1,7488	0,8215	10,809	0,666
1300	0,7984	0,8478	0,8608	0,9772	1,7815	0,8294	10,899	
1400	0,8051	0,8558	0,8688	0,4893	1,8129	0,8369	10,988	
1500	0,8114	0,8633	0,8763	1,0006	1,8434	0,8441	11,077	
1600	0,8173	0,8704	0,8830	1,0107	1,8728	0,8508	11,169	
1700	0,8231	0,8771	0,8893	1,0203	1,9016	0,8570	11,258	
1800	0,8286	0,8830	0,8956	1,0291	1,9293	0,8633	11,347	
1900	0,8340	0,8889	0,9014	1,0371	1,9552	0,8688	11,437	
2000	0,8390	0,8943	0,9066	1,0446	1,9804	0,8742	11,524	
2100	0,8441	0,8997	0,9115	1,0517	2,0051	0,8792	11,611	
2200	0,8491	0,9048	0,9161	1,0580	2,0281	0,8843	11,694	
2300	0,8537	0,4094	0,9207	1,0639	2,0503	0,8889	11,798	
2400	0,8583	0,9136	0,9249	1,0697	2,0720	0,8930	11,858	
2500	0,8629	0,9177	0,9291	1,0749	2,0926	0,8972	11,937	

Таблица ПЗ - Средняя объемная теплоемкость газов при постоянном давлении от 0<sup>0</sup>С до t<sup>0</sup>С  $c'_{рт}$ , кДж/(м<sup>3</sup> К)

$t, ^\circ\text{C}$	$O_2$	$N_2$	$CO$	$CO_2$	$H_2O$	<i>Воздух</i>	$H_2$	$SO_2$
0	1,3059	1,2981	1,2992	1,5998	1,4930	1,2971	1,2766	1,733
100	1,3176	1,3004	1,3017	1,7003	1,5052	1,3001	1,2908	1,813
200	1,3352	1,3038	1,3071	1,7873	1,5223	1,3071	1,2971	1,888
300	1,3561	1,3109	1,3167	1,8627	1,5424	1,3172	1,2992	1,955
400	1,3775	1,3205	1,3289	1,9297	1,5654	1,3289	1,3021	2,018
500	1,3980	1,3322	1,3427	1,9887	1,5897	1,3427	1,3050	2,068
600	1,4168	1,3452	1,3574	2,0411	1,6148	1,3565	1,3080	2,114
700	1,4344	1,3586	1,3720	2,0884	1,6412	1,3708	1,3121	2,152
800	1,4499	1,3716	1,3862	2,1311	1,6680	1,3842	1,3167	2,181
900	1,4645	1,3845	1,3996	2,1692	1,6957	1,3976	1,3226	2,215
1000	1,4775	1,3971	1,4126	2,2035	1,7229	1,4097	1,3289	2,236
1100	1,4892	1,4086	1,4248	2,2349	1,7501	1,4214	1,3360	2,261
1200	1,5005	1,4202	1,4361	2,2638	1,7769	1,4327	1,3431	2,278
1300	1,5106	1,4306	1,4465	2,2898	1,8028	1,4432	1,3511	
1400	1,5202	1,4407	1,4566	2,3136	1,8280	1,4528	1,3591	
1500	1,5294	1,4499	1,4658	2,3354	1,8527	1,4620	1,3674	
1600	1,5378	1,4587	1,4746	2,3555	1,8761	1,4708	1,3754	
1700	1,5462	1,4671	1,4825	2,3743	1,8996	1,4788	1,3833	
1800	1,5541	1,4746	1,4901	2,3915	1,9213	1,4867	1,3917	
1900	1,5617	1,4821	1,4972	2,4047	1,9423	1,4939	1,3996	
2000	1,5692	1,4888	1,5039	2,4221	1,9628	1,5010	1,4076	
2100	1,5759	1,4955	1,5102	2,4359	1,9824	1,5072	1,4151	
2200	1,5830	1,5018	1,5160	2,4489	2,0009	1,5135	1,4227	
2300	1,5897	1,5072	1,5215	2,4602	2,0189	1,5194	1,4302	
2400	1,5964	1,5127	1,5269	2,4710	2,0365	1,5253	1,4373	
2500	1,6027	1,5177	1,5320	2,4811	2,0528	1,5303	1,4449	

Таблица П4 - Средняя объемная теплоемкость газов при постоянном объеме от 0<sup>0</sup>С до t<sup>0</sup>С  $c'_{\text{от}}$ , кДж/(м<sup>3</sup> К)

$t, ^\circ\text{C}$	$O_2$	$N_2$	$CO$	$CO_2$	$H_2O$	<i>Воздух</i>	$H_2$	$SO_2$
0	0,9349	0,9278	0,9282	1,2288	1,1237	0,9261	0,9056	1,361
100	0,9466	0,9295	0,9307	1,3293	1,1342	0,9295	0,9198	1,440
200	0,9642	0,9328	0,9362	1,4164	1,1514	0,9362	0,9261	1,516
300	0,9852	0,9399	0,9458	1,4918	1,1715	0,9462	0,9282	1,587
400	1,0065	0,9496	0,9579	1,5587	1,1945	0,9579	0,9311	1,645
500	1,0270	0,9613	0,9718	1,6278	1,2183	0,9718	0,9341	1,700
600	1,0459	0,9743	0,9864	1,6701	1,2439	0,9856	0,9370	1,742
700	1,0634	0,9877	1,0011	1,7174	1,2703	0,9993	0,9412	1,779
800	1,0789	1,0006	1,0153	1,7601	1,2971	1,0312	0,9458	1,183
900	1,0936	1,0136	1,0287	1,7982	1,3247	1,0262	0,9516	1,842
1000	1,1066	1,0178	1,0417	1,8326	1,3519	1,0387	0,9579	1,867
1100	1,1183	1,0379	1,0538	1,8640	1,3791	1,0505	0,9650	1,888
1200	1,1296	1,0492	1,0651	1,8929	1,4059	1,0618	0,9722	1,905
1300	1,1396	1,0597	1,0756	1,9188	1,4319	1,0722	0,9801	
1400	1,1493	1,0697	1,0856	1,9427	1,4570	1,0819	0,9881	
1500	1,1585	1,0789	1,0948	1,9644	1,4817	1,0911	0,9964	
1600	1,1669	1,0877	1,1036	1,9845	1,5052	1,099	1,0044	
1700	1,1752	1,0961	1,1116	2,0034	1,5286	1,1078	1,0124	
1800	1,1832	1,1036	1,1191	2,0205	1,5504	1,1158	1,0207	
1900	1,1907	1,1112	1,1262	2,0356	1,5713	1,1229	1,0287	
2000	1,1978	1,1179	1,1329	2,0511	1,5918	1,1296	1,0366	
2100	1,2050	1,1246	1,1392	2,0649	1,6115	1,1363	1,0442	
2200	1,2121	1,1304	1,1451	2,0775	1,6299	1,1426	1,0517	
2300	1,2188	1,1363	1,1505	2,0892	1,6479	1,1484	1,0593	
2400	1,2255	1,1417	1,1560	2,1001	1,6655	1,1543	1,0664	
2500	1,2318	1,1468	1,1610	2,1101	1,6818	1,1593	1,0739	

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Пример оформления титульного листа контрольной работы

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Норильский государственный индустриальный институт»  
Политехнический колледж

**КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА**

по дисциплине: «Основы термодинамики»

ВЫПОЛНИЛ :

Студент группы

Ф. И. О.

Шифр

Вариант

ПРОВЕРИЛ:

Преподаватель

Стрельникова Л.И.

2018

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

### Пример оформления содержания контрольной работы

#### Содержание

(указать  
нумерацию  
страниц)

Задание1

---

Задание2

---

Задание3

---

Задание4

---

Список использованных источников

## Экзаменационные вопросы по курсу «Основы термодинамики»

1. Параметры состояния тела. Основные понятия и определения. Основные единицы измерения  $P, T, v, \rho$ .
2. Законы идеальных газов. Понятие идеального газа. Уравнения состояния идеальных газов.
3. Газовые смеси. Способы задания смеси. Плотность. Газовая постоянная, кажущаяся молекулярная масса смеси. Парциальное давление. Закон Дальтона.
4. Теплоемкость газов. Понятие истинной и средней теплоемкости. Изобарная и изохорная теплоемкость. Зависимость теплоемкости от температуры.
5. Теплоемкость газовых смесей. Удельная теплоемкость.
6. Понятие теплоты и работы. Элементарная и полная работа расширения. Аналитическое выражение I закона термодинамики. Энтальпия.
7. Внутренняя потенциальная и кинетическая энергия. Единицы измерения в системе СИ.
8. Исследование основных термодинамических процессов в газах.  $P, v$ -диаграмма.
9. Круговые процессы. Прямой и обратный круговые циклы. Термический коэффициент полезного действия. Работа цикла. Полезно используемая теплота цикла. Холодильный коэффициент.
10. Прямой и обратный циклы Карно. Практическое применение цикла.
11. Второй закон термодинамики и его математическое выражение. Энтропия.  $TS$ -диаграмма.
12. Термодинамические процессы цикла Карно.
13. Циклы поршневых двигателей ДВС с подводом теплоты пара при  $P=const; v=const$ .
14. Циклы газотурбинных установок с подводом теплоты при  $P=const; v=const$ .

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Норильский государственный индустриальный институт»  
Политехнический колледж

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 1

Курс: 1 заочной формы обучения  
Группа: 1ТЭ  
Специальность: 13.02.01 «Тепловые электрические станции»

Дисциплина: Основы термодинамики

1. Параметры состояния тела. Основные понятия и определения. Основные единицы измерения  $P$ ,  $T$ ,  $v$ ,  $\rho$ .
2. Циклы паротурбинных установок. Цикл Карно для водяного пара.  $P$ ,  $v$  – диаграмма цикла Карно.
  
3. Задача.

Преподаватель

Л.И. Стрельникова

Председатель комиссии

С.И. Семенова