

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 ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ**

по учебной дисциплине  
**ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ**

для специальности  
13.02.01 Тепловые электрические станции

**Методические указания по выполнению практических работ** по учебной дисциплине «Основы термодинамики», разработаны на основе Федерального государственного образовательного стандарта по специальности 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

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Практическая работа 1 .....	6
<b>Расчет параметров состояния рабочего тела</b>	
Практическая работа 2 .....	11
<b>Расчет состава газовой смеси</b>	
Практическая работа 3 .....	14
<b>Расчет теплоемкости газов и газовых смесей</b>	
Практическая работа 4 .....	22
<b>Определение работы, изменения внутренней энергии, энтальпии</b>	
Практическая работа 5.....	27
<b>Расчет двигателя внутреннего сгорания</b>	
Список используемой литературы.....	31
Приложение А.....	32
Приложение Б.....	33
Приложение В.....	34
Приложение Г.....	36

## Введение

Методические указания разработаны в соответствии с рабочей программой учебной дисциплины «Основы термодинамики» предназначенной для обучающихся специальности 13.02.01 Тепловые электрические станции.

Программой дисциплины предусматривается изучение основных газовых законов, понятия теплоемкости, работы, внутренней энергии и их определение; основных термодинамических процессов газов.

Для закрепления теоретических знаний, приобретения необходимых практических навыков и умений программой дисциплины предусматривается решение технических задач.

Выполнение данных практических работ в дальнейшем пригодится обучающимся при выполнении курсовых работ по специальным дисциплинам и дипломных проектов.

Студентам необходимо самостоятельно изучить темы разделов и устно ответить на контрольные вопросы после каждой работы.

При оформлении практической работы необходимо указывать тему, цель, задание, порядок расчета и вывод. Номер варианта соответствует порядковому номеру студента по журналу.

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.

## Практическая работа 1

### Расчет параметров состояния рабочего тела

**Цель работы.** Определение основных параметров любого газа с помощью основных законов идеальных газов и уравнения состояния идеального газа.

#### Теоретическая часть

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:

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

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  $Pv = RT;$  (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,  $\text{кг}$ ;

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

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

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

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

Выше перечисленные величины для различных газов приводятся в таблице А1 (Приложение А)

$$\mu R = \frac{PV_{\mu}}{T} \quad (1.9)$$

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:

$$\mu R = \frac{PV_{\mu}}{T} = \frac{101325 \cdot 22,4}{273} = 8314, \frac{Дж}{кмоль \cdot К}. \quad (1.10)$$

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

Пользуясь характеристическим уравнением для двух различных состояний какого-либо газа, можно получить выражение для определения любого параметра при переходе от одного состояния к другому

$$\frac{P_1 \upsilon_1}{T_1} = \frac{P_2 \upsilon_2}{T_2}, \quad (1.11)$$

или

$$\frac{PV_1}{T_1} = \frac{PV_2}{T_2}. \quad (1.12)$$

Уравнение (1.11) можно переписать следующим образом:

$$\frac{P_1}{\rho_1 T_1} = \frac{P_2}{\rho_2 T_2} \Rightarrow \rho_2 = \rho_1 \frac{P_2}{P_1} \cdot \frac{T_1}{T_2}. \quad (1.13)$$

Это уравнение позволяет определить плотность газа при любых условиях, если значение его для определенных условий известно.

Уравнение (1.12) часто принимают для определения объемах, занимаемого газом при нормальных условиях ( $t = 0^{\circ}C$ ;  $P = 760 \text{ мм. рт. ст}$ ), если его объем при каких-либо значениях  $P$  и  $t$  известен. Для этого уравнение предусматривают в следующем виде:

$$\frac{PV}{T} = \frac{P_H V_H}{T_H} \Rightarrow V_H = \frac{PVT_H}{TP_H}, \quad (1.14)$$

где  $P_H$ ,  $V_H$ ,  $T_H$  – давление, объем и температура газа даны при нормальных условиях.

## Задание

### Задача 1

*Вариант 1 – 5* Определить массу углекислого газа в сосуде с объемом  $V, м^3$  при температуре  $t, ^\circ C$ . Давление газа по манометру равно  $P_{МАН}, бар$ . Барометрическое давление  $P_{БАР}, мм.рт.ст$

### Задача 2

*Вариант 6 – 10* Определить массу кислорода, содержащегося в баллоне емкостью  $V, л$ , если давление кислорода по манометру равно  $P_{МАН}, бар$ , а показания ртутного барометра  $P_{БАР}, мм.рт.ст$  при температуре  $t_1, ^\circ C$ .

### Задача 3

*Вариант 11 – 15* В сосуде находится воздух под разрежением  $P_{РАЗ}, мм.рт.ст$  при температуре  $0, ^\circ C$ . Ртутный барометр показывает  $P_{БАР}, мм.рт.ст$  при температуре ртути  $t_1, ^\circ C$ . Определить удельный объем воздуха при этих условиях.

### Задача 4

*Вариант 16 – 20* В цилиндре диаметром  $d, см$  содержится  $V, м^3$  при давлении  $P_{АВС}, бар$ , и температуре  $t, ^\circ C$ . До какой температуры должен нагреваться воздух при постоянном давлении, чтобы движущийся без трения поршень поднялся на  $h, см$ ?

### Задача 5

*Вариант 21 – 32* В сосуде объемом  $V, м^3$  находится воздух при давлении  $P_{АВС}, Мн/м^2$  и температуре  $t, ^\circ C$ . Сколько воздуха надо выкачать из сосуда, чтобы разрежение в нем составило  $P_{РАЗ}, мм.рт.ст$  при условии, что температура в сосуде не изменится? Атмосферное давление по ртутному барометру равно  $P_{БАР}, мм.рт.ст$  при температуре равной  $t_1, ^\circ C$ . Разрежение в сосуде измерено ртутным вакуумметром при температуре ртути  $t, ^\circ C$ .



**Таблица 1.1 – Расчетные данные**

Задача 1	№ Вар	V, м <sup>3</sup>	t, °C	P <sub>МАН</sub> , бар	P <sub>БАР</sub> , мм.рт.ст		
	1	4	80	0,4	780		
	2	5	70	0,5	785		
	3	3	75	0,6	770		
	4	2	60	0,8	760		
	5	9	85	0,9	780		
Задача 2	№ Вар	V, л	t <sub>1</sub> , °C	P <sub>МАН</sub> , бар	P <sub>БАР</sub> , мм.рт.ст		
	6	60	25	10,8	745		
	7	50	20	10,2	750		
	8	70	30	11,0	755		
	9	55	35	8,8	760		
	10	65	40	8,9	765		
Задача 3	№ Вар	P <sub>РАЗ</sub> , мм.рт.ст	t <sub>1</sub> , °C	P <sub>БАР</sub> , мм.рт.ст			
	11	75	20	748			
	12	60	15	740			
	13	65	18	750			
	14	70	20	760			
	15	80	25	770			
Задача 4	№ Вар	V, м <sup>3</sup>	t, °C	P <sub>АБС</sub> , бар	d, см	h, см	
	16	0,45	35	2,5	60	40	
	17	0,4	30	4,2	50	60	
	18	0,5	40	2,8	55	50	
	19	0,6	45	3,0	65	55	
	20	0,7	50	3,5	70	65	
Задача 5	№ Вар	V, м <sup>3</sup>	t, °C	P <sub>АБС</sub> , мн/м <sup>2</sup>	P <sub>РАЗ</sub> , мм.рт.ст	P <sub>БАР</sub> , мм.рт.ст	t <sub>1</sub> , °C
	21	0,5	20	0,2	420	768	18
	22	0,6	20	0,3	430	760	20
	23	0,7	15	0,5	440	750	10
	24	1,0	30	0,8	450	768	15
	25	2,0	35	0,9	500	770	20
	26	3,0	40	1,2	530	760	25
	27	4,0	45	1,3	520	750	30
	28	5,0	50	1,4	540	770	20
	29	6,0	55	1,6	550	780	28
	30	9,0	60	2,0	580	790	36
	31	7,0	65	1,5	500	770	30
	32	6,0	40	1,4	580	750	20

### **Контрольные вопросы**

1. Дать определение идеального газа.
2. Дать определение реального газа.
3. Сформулировать закон Бойля-Мариотта.
4. Сформулировать закон Гей-Люссака.
5. Сформулировать закон Авогадро.
6. Уравнения состояния идеального газа (для 1 кг, М кг; 1 кмоль газа).
7. Дать определение параметров состояния газа.
8. Охарактеризовать основные параметры состояния газа.
9. Определение манометрического давления.
10. Определение вакуумметрического давления.
11. Определение абсолютного давления.
12. Какие условия называются нормальными.
13. Пояснить физический смысл универсальной газовой постоянной.
14. Пояснить физический смысл газовой постоянной.

Рекомендуемая литература:

[ 1, с.8, 19 ]

## Практическая работа 2

### Расчет состава газовой смеси

**Цель работы.** Определение состава газовой смеси

#### Теоретическая часть

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  $M$ .

$$m_1 = \frac{M_1}{M}; \quad m_2 = \frac{M_2}{M}; \quad m_n = \frac{M_n}{M}, \quad (2.1)$$

Объемной долей 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):

$$r_1 = \frac{V_1}{V}; \quad r_2 = \frac{V_2}{V}; \quad r_n = \frac{V_n}{V} \quad (2.2)$$

Очевидно, что:

$$M_1 + M_2 + \dots + M_n = M, \quad (2.3)$$

$$m_1 + m_2 + \dots + m_n = 1, \quad (2.4)$$

$$V_1 + V_2 + \dots + V_n = V, \quad (2.5)$$

$$r_1 + r_2 + \dots + r_n = 1. \quad (2.6)$$

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

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_n. \quad (2.7)$$

Парциальное давление отдельного газа входящего в смесь определяется:

– если смесь задана объемными долями:

$$P_i = P \cdot r_i; \quad P_i = P \cdot r_i,$$

– если смесь задана массовыми долями:

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

Плотность смеси  $\rho_{CM}$ ; удельный объем смеси  $\upsilon_{CM}$ ; кажущаяся молекулярная масса смеси  $\mu_{CM}$  и газовая постоянная смеси рассчитываются по формулам таблицы Б1 (Приложение Б).

### Задание

Определить массовый состав газовой смеси  $m_1$  - ?  $m_2$  - ? состоящей из двух газов, если известно парциальное давление одного из газов  $P_1$  бар, и давление всей смеси  $P_{CM}$  бар. Газовые постоянные  $R$  для каждого газа находятся по таблице А1 (Приложение А)

### Порядок расчета

1. Определяем парциальное давление второго газа

$$P_2 = P_{CM} - P_1, \text{ бар.} \quad (2.8)$$

2. Выразим массовые доли каждого газа из формулы определения парциального давления:

$$P_i = m_i \frac{R_i}{R_{CM}} P_{CM}, \quad (2.9)$$

отсюда

$$m_i = \frac{P_i}{P_{CM}} \cdot \frac{R_{CM}}{R_i}. \quad (2.10)$$

3. Зная, что:

$$m_1 + m_2 = 1. \quad (2.11)$$

Запишем это равенство в другом виде, подставив значения  $m_1$  и  $m_2$ , выраженные уравнением (2.10)

$$\frac{P_1}{P_{CM}} \cdot \frac{R_{CM}}{R_1} + \frac{P_2}{P_{CM}} \cdot \frac{R_{CM}}{R_2} = 1. \quad (2.12)$$

4. Из уравнения (2.12) найдем значение газовой постоянной смеси  $R_{CM}$ :

$$R_{CM} = \frac{P_{CM}}{\left( \frac{P_1}{R_1} + \frac{P_2}{R_2} \right)}. \quad (2.13)$$

5. Определив значения  $R_{CM}$ , найдем массовую долю одного из газов:

$$m_1 = \frac{P_1 R_{CM}}{P_{CM} R_1}. \quad (2.14)$$

6. Значение  $m_2$  определим, как

$$m_2 = \frac{P_2 R_{CM}}{P_{CM} R_2}$$

### Вывод

**Таблица 2.1 – Расчетные данные**

Вариант	Смесь задана	Давление	Вариант	Смесь задана	Давление
1	$m_{CO_2}$ $m_{N_2}$	$P_{CO_2} = 1,2 \text{ бар}$ $P_{CM} = 2 \text{ бар}$	17	$m_{CO}$ $m_{N_2}$	$P_{CO} = 1,3 \text{ бар}$ $P_{CM} = 6 \text{ бар}$
2	$m_{O_2}$ $m_{Ar}$	$P_{O_2} = 2,0 \text{ бар}$ $P_{CM} = 5 \text{ бар}$	18	$m_{CO_2}$ $m_{Ar}$	$P_{CO_2} = 4,0 \text{ бар}$ $P_{CM} = 7 \text{ бар}$
3	$m_{CO}$ $m_{N_2}$	$P_{CO} = 1,2 \text{ бар}$ $P_{CM} = 3 \text{ бар}$	19	$m_{CO_2}$ $m_{H_2O}$	$P_{CO_2} = 2,0 \text{ бар}$ $P_{CM} = 6 \text{ бар}$
4	$m_{CO_2}$ $m_{Ar}$	$P_{CO_2} = 1,3 \text{ бар}$ $P_{CM} = 4 \text{ бар}$	20	$m_{O_2}$ $m_{Ar}$	$P_{O_2} = 2,5 \text{ бар}$ $P_{CM} = 4 \text{ бар}$
5	$m_{CO_2}$ $m_{H_2O}$	$P_{CO_2} = 1,4 \text{ бар}$ $P_{CM} = 5 \text{ бар}$	21	$m_{CO}$ $m_{N_2}$	$P_{CO} = 2,5 \text{ бар}$ $P_{CM} = 6,5 \text{ бар}$
6	$m_{O_2}$ $m_{Ar}$	$P_{O_2} = 3,0 \text{ бар}$ $P_{CM} = 6 \text{ бар}$	22	$m_{CO_2}$ $m_{N_2}$	$P_{CO_2} = 3 \text{ бар}$ $P_{CM} = 8 \text{ бар}$
7	$m_{CO}$ $m_{N_2}$	$P_{CO} = 1,4 \text{ бар}$ $P_{CM} = 2 \text{ бар}$	23	$m_{CO_2}$ $m_{Ar}$	$P_{CO_2} = 3,5 \text{ бар}$ $P_{CM} = 7 \text{ бар}$
8	$m_{CO_2}$ $m_{N_2}$	$P_{CO_2} = 1,5 \text{ бар}$ $P_{CM} = 6 \text{ бар}$	24	$m_{Ar}$ $m_{N_2}$	$P_{Ar} = 1,2 \text{ бар}$ $P_{CM} = 3 \text{ бар}$
9	$m_{CO_2}$ $m_{Ar}$	$P_{CO_2} = 2,0 \text{ бар}$ $P_{CM} = 6 \text{ бар}$	25	$m_{CO_2}$ $m_{H_2O}$	$P_{CO_2} = 4,0 \text{ бар}$ $P_{CM} = 10 \text{ бар}$
10	$m_{Ar}$ $m_{N_2}$	$P_{Ar} = 3,0 \text{ бар}$ $P_{CM} = 9 \text{ бар}$	26	$m_{O_2}$ $m_{Ar}$	$P_{O_2} = 3,0 \text{ бар}$ $P_{CM} = 6 \text{ бар}$
11	$m_{CO_2}$ $m_{H_2O}$	$P_{CO_2} = 3,0 \text{ бар}$ $P_{CM} = 5 \text{ бар}$	27	$m_{CO}$ $m_{N_2}$	$P_{CO} = 5,0 \text{ бар}$ $P_{CM} = 8 \text{ бар}$
12	$m_{O_2}$ $m_{Ar}$	$P_{O_2} = 4 \text{ бар}$ $P_{CM} = 10 \text{ бар}$	28	$m_{CO_2}$ $m_{N_2}$	$P_{CO_2} = 4,5 \text{ бар}$ $P_{CM} = 8,5 \text{ бар}$
13	$m_{CO}$ $m_{N_2}$	$P_{CO} = 1,4 \text{ бар}$ $P_{CM} = 4 \text{ бар}$	29	$m_{O_2}$ $m_{Ar}$	$P_{O_2} = 3,5 \text{ бар}$ $P_{CM} = 8 \text{ бар}$
14	$m_{CO_2}$ $m_{N_2}$	$P_{CO_2} = 1,2 \text{ бар}$ $P_{CM} = 5 \text{ бар}$	30	$m_{CO}$ $m_{O_2}$	$P_{CO} = 1,5 \text{ бар}$ $P_{CM} = 8 \text{ бар}$
15	$m_{O_2}$ $m_{Ar}$	$P_{O_2} = 1,5 \text{ бар}$ $P_{CM} = 5 \text{ бар}$	31	$m_{CO}$ $m_{O_2}$	$P_{O_2} = 2,0 \text{ бар}$ $P_{CM} = 10 \text{ бар}$
16	$m_{CO_2}$ $m_{N_2}$	$P_{CO_2} = 1,5 \text{ бар}$ $P_{CM} = 3 \text{ бар}$	32	$m_{CO}$ $m_{N_2}$	$P_{CO_2} = 1,3 \text{ бар}$ $P_{CM} = 3,0 \text{ бар}$

**Контрольные вопросы**

1. Дать определение массовых долей компонентов газовой смеси.
2. Дать определение объемных долей компонентов газовой смеси.
3. Закон Дальтона.
4. Определение парциального давления.
5. Определение кажущейся молекулярной массы газа.
6. Определение газовой постоянной смеси.
7. Определение удельного объема и плотности газовой смеси.
8. Чему равна сумма массовых долей?
9. Чему равна сумма объемных долей?
10. Определение кажущейся молекулярной массы смеси газов.

Рекомендуемая литература: [ 1, с.31 ], [2, с.130]

### Практическая работа 3

#### 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:

$$c = c' \nu_H = \frac{\mu c}{\mu}, \quad (3.1)$$

или

$$c' = c \rho_H = \frac{\mu c}{22,4}, \quad (3.2)$$

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  $t_2$ :

$$C_m = \frac{q}{t_2 - t_1}. \quad (3.3)$$

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:

$$\mu c_P - \mu c_\nu = \mu R \approx 8,314, \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}} \quad (3.4)$$

Между массовыми теплоемкостями существует следующая зависимость (уровнение Майера):

$$c_P = c_\nu + R, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}. \quad (3.5)$$

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

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} = \frac{c_p'}{c_v'} = \frac{\mu c_p}{\mu c_v} = 1 + \frac{R}{c_v} \quad (3.6)$$

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:

$$c = a + bt, \quad (3.7)$$

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:

$$c_{m \frac{t_2}{t_1}} = \frac{c_{m \frac{t_2}{0}} t_2 - c_{m \frac{t_1}{0}} t_1}{t_2 - t_1}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \quad (3.8)$$

где  $c_{m \frac{t_2}{0}}$  и  $c_{m \frac{t_1}{0}}$  – средние нелинейные теплоемкости от 0 °С до  $t_2$  и от 0 °С до  $t_1$ , которые берутся из таблиц В1 – В4 (Приложение В).

Аналогичными являются формулы для определения объемных и мольных теплоемкостей.

#### *Теплоемкость смеси газов*

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

$$c_{см} = m_1 c_1 + m_2 c_2 + \dots + m_n c_n, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \quad (3.9)$$

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:

$$c'_{cm} = r_1 c'_1 + r_2 c'_2 + \dots + r_n c'_n, \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}, \quad (3.10)$$

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

Мольная теплоемкость:

$$\mu c_{CM} = \sum_1^n r_n \cdot \mu c_n, \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}} \quad (3.11)$$

Для вычисления количества тепла, которое необходимо затратить в процессе нагревания  $1 \text{ кг}$  газа в интервале температур от  $t_1$  °C до  $t_2$  пользуются формулой:

$$q = c_m \int_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) = c_{m2} t_2 - c_{m1} t_1, \quad (3.12)$$

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:

$$q_v = C_v m_2 \cdot t_2 - C_v m_1 \cdot t_1, \quad (3.13)$$

в изобарном соответственно:

$$q_p = C_p m_2 \cdot t_2 - C_p m_1 \cdot t_1. \quad (3.14)$$

Если в процессе участвуют  $M \text{ кг}$  или  $V_H \text{ м}^3$  газа, то подсчет тепла производится по формулам:

$$Q_v = M(c_{vm2} \cdot t_2 - c_{vm1} \cdot t_1) = V_H (c'_{vm2} \cdot t_2 - c'_{vm1} \cdot t_1) \quad (3.15)$$

$$Q_p = M(c_{pm2} \cdot t_2 - c_{pm1} \cdot t_1) = V_H (c'_{pm2} \cdot t_2 - c'_{pm1} \cdot t_1) \quad (3.16)$$

## Задание

### Вариант 1-17

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 Б1 (Приложение Б), 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 В1; В2 (Приложение В).



### 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:

$$v_{CM} = \sum_1^n \frac{m_i}{\rho_i} = \frac{m_1}{\rho_1} + \frac{m_2}{\rho_2} + \dots + \frac{m_n}{\rho_n}, \frac{M^3}{кг} \quad (3.17)$$

Плотность смеси:

$$\rho_{CM} = \frac{I}{\sum_1^n \frac{m_i}{\rho_i}} = \frac{I}{\frac{m_1}{\rho_1} + \frac{m_2}{\rho_2} + \dots + \frac{m_n}{\rho_n}}, \frac{кг}{M^3} \quad (3.18)$$

Кажущаяся молекулярная масса смеси:

$$\mu_{CM} = \frac{I}{\sum_1^n \frac{m_i}{\mu_i}} = \frac{I}{\frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2} + \dots + \frac{m_n}{\mu_n}} \quad (3.19)$$

Газовая постоянная смеси:

$$R_{CM} = \sum_1^n m_i R_i = m_1 R_1 + m_2 R_2 + \dots + m_n R_n, \frac{Дж}{кг \cdot ^\circ K} \quad (3.20)$$

Парциальное давление каждого газа:

$$P_i = m_i \frac{R_i}{R_{CM}} \cdot P, \text{ мм.рт.ст.} \quad (3.21)$$

4. Определяем среднюю массовую теплоемкость газовой смеси в изобарном процессе:

$$C_{Pm(CM)} = \sum_1^n m_i C_{Pmi} = m_1 C_{Pm1} + m_2 C_{Pm2} + \dots + m_n C_{Pmn}, \frac{Дж}{кг \cdot ^\circ K}, \quad (3.22)$$

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 В1 (Приложение В);

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

5. Средняя массовая теплоемкость в изохорном процессе определяется по формуле:

$$C_{vm(CM)} = \sum_1^n m_i C_{vmi} = m_1 C_{vm1} + m_2 C_{vm2} + \dots + m_n C_{vnn}, \frac{Дж}{кг \cdot ^\circ K}, \quad (3.23)$$

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).

### Вариант 18-32

Смесь газов имеет объемный состав:  $V_1$ ;  $V_2$ ;  $V_3$ . Определить молекулярную массу смеси  $\mu_{CM}$ ; газовую постоянную смеси  $R_{CM}$ , удельный объем смеси  $\nu_{CM}$ , плотность смеси  $\rho_{CM}$ ; парциальные давления компонентов, входящих в смесь при заданном давлении смеси  $P_{CM}$ .

Определить среднюю объемную 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).

Средние объемные теплоемкости для различных газов при нелинейной зависимости теплоемкости от температуры, в изобарном ( $P = const$ ) и изохорном ( $\nu = const$ ) процессах принимаются по таблицам В3; В4 (Приложение В)

#### Порядок расчета

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

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 объемными долями по следующим формулам.

Удельный объем смеси:

$$\nu_{CM} = \frac{1}{\sum_1^n r_i \rho_i} = \frac{1}{r_1 \rho_1 + r_2 \rho_2 + \dots + r_n \rho_n}, \frac{M^3}{кг} \quad (3.24)$$

Плотность смеси:

$$\rho_{CM} = \sum_1^n r_i \rho_i = r_1 \rho_1 + r_2 \rho_2 + \dots + r_n \rho_n, \frac{кг}{M^3} \quad (3.25)$$

Кажущаяся молекулярная масса смеси:

$$\mu_{CM} = \sum_1^n r_i \mu_i = r_1 \mu_1 + r_2 \mu_2 + \dots + r_n \mu_n \quad (3.26)$$

Газовая постоянная смеси:

$$R_{CM} = \frac{8314}{\sum_1^n r_i \mu_i} = \frac{8314}{r_1 \mu_1 + r_2 \mu_2 + \dots + r_n \mu_n}, \frac{Дж}{кг \cdot ^\circ K} \quad (3.27)$$

Парциальное давление каждого газа:

$$P_i = r_i \cdot P \quad (3.28)$$

4. Определяем среднюю объемную теплоемкость газовой смеси в изобарном процессе:

$$C'_{Pm(CM)} = \sum_1^n r_i C'_{Pmi} = r_1 C'_{Pm1} + r_2 C'_{Pm2} + \dots + r_n C'_{Pmn}, \frac{Дж}{М^3 \cdot 0 K}, \quad (3.29)$$

где  $C'_{Pmi} = \frac{C'_{Pm0} / \cdot t_2 - C'_{Pm0} / \cdot t_1}{t_2 - t_1}$  – средняя объемная теплоемкость каждого

отдельного газа, входящего в смесь при заданном интервале температур  $t_1$  и  $t_2$  берем из таблицы В3 (Приложение В)

5. Средняя объемная теплоемкость в изохорном процессе определяется по формуле:

$$C'_{vm(CM)} = \sum_1^n r_i C'_{vmi} = r_1 C'_{vm1} + r_2 C'_{vm2} + \dots + r_n C'_{vnn}, \frac{Дж}{М^3 \cdot 0 K}, \quad (3.30)$$

где  $C'_{vmi} = \frac{C'_{vm0} / \cdot t_2 - C'_{vm0} / \cdot t_1}{t_2 - t_1}$  – средняя объемная теплоемкость каждого

отдельного газа, входящего в смесь при изохорном процессе в заданном интервале  $t_1$  и  $t_2$  берем из таблицы В4 (Приложение В)

### Контрольные вопросы

1. Дать определение истинной теплоемкости.
2. Дать определение средней теплоемкости.
3. Какие существуют соотношения между массовыми, объемными и мольными теплоемкостями.
4. Какой бывает теплоемкость зависимости от единицы количества газа.
5. Уравнение Майера.
6. Нелинейная зависимость теплоемкости от температуры.
7. Определение средней массовой теплоемкости при нелинейной зависимости теплоемкости от температуры.
8. Определение средней объемной теплоемкости при нелинейной зависимости теплоемкости от температуры.
9. Линейная зависимость теплоемкости от температуры.
10. Теплоемкость газовой смеси.
11. Что выражает показатель адиабаты?

Рекомендуемая литература: [ 1, с.36 ], [2, с.135]

**Таблица 3.1-Расчетные данные к вариантам 1-17**

<i>№ вариан т</i>	<i>Заданный состав смеси</i>	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$P_{CM}$ <i>мм.рт .ст</i>	$t_1$ $^{\circ}C$	$t_2$ $^{\circ}C$
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
17	– « –	CO 10%	воздух 20%	O <sub>2</sub>	750	20	400

**Таблица 3.2- Расчетные данные к вариантам 18-32**

№ вариант	Заданный состав смеси	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$P_{CM}$ мм.рт.ст	$t_1$ °C	$t_2$ °C
18	Объемными долями	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O 50%	CO 26%	750	0	220
19	– « –	O <sub>2</sub> 16%	CO <sub>2</sub> 18%	N <sub>2</sub>	740	160	700
20	– « –	O <sub>2</sub> 25%	H <sub>2</sub> O 10%	N <sub>2</sub>	770	180	450
21	– « –	воздух 60%	CO 15%	N <sub>2</sub>	760	500	700
22	– « –	CO <sub>2</sub> 30%	CO 20%	O <sub>2</sub>	760	380	700
23	– « –	O <sub>2</sub> 10%	CO <sub>2</sub> 70%	N <sub>2</sub>	740	400	780
24	– « –	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O 20%	CO <sub>2</sub> 40%	740	450	700
25	– « –	O <sub>2</sub> 20%	CO	N <sub>2</sub> 65%	750	300	770
26	– « –	воздух 70%	O <sub>2</sub> 12%	N <sub>2</sub>	740	550	750
27	– « –	CO <sub>2</sub> 35%	N <sub>2</sub> 35%	O <sub>2</sub>	760	600	780
28	– « –	CO <sub>2</sub> 45%	H <sub>2</sub> O	O <sub>2</sub> 40%	760	300	700
29	– « –	CO 30%	N <sub>2</sub> 28%	O <sub>2</sub>	770	400	700
30	– « –	O <sub>2</sub> 24%	воздух 16%	N <sub>2</sub>	770	200	680
31	– « –	воздух 10%	CO <sub>2</sub> 60%	O <sub>2</sub>	750	220	400
32	– « –	O <sub>2</sub> 20%	CO <sub>2</sub> 45%	H <sub>2</sub> O	750	100	500

## Практическая работа 4

### Определение работы, изменения внутренней энергии, энтальпии

**Цель работы.** Определение работы, внутренней энергии, энтальпии и количества подводимой (отводимой) теплоты в термодинамических процессах для различных газов.

#### Теоретическая часть

##### *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:

$$\int_1^2 du = u_2 - u_1, \quad (4.1)$$

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:

$$dl = P \cdot dv, \quad (4.2)$$

где  $P$  – абсолютное давление газа;  
 $dV$  – приращение объема в элементарном процессе.

Так как  $P$  – величина положительная, то  $dV$  и  $dW$  по знаку одинаковы. Поэтому  $dV > 0$ , то газ расширяется, тогда  $dW > 0$ , следовательно, работа расширения положительна. Если  $dV < 0$ , то газ сжимается, следовательно, работа сжатия - отрицательна. Произвольный процесс расширения 1-2 изображен на рис. 4.1.

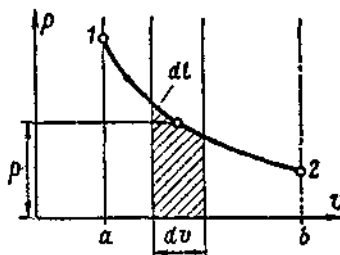


Рисунок 4.1- Изображение работы газа в  $P, v$  – диаграмме

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  $L$  кг газа в процессе 1-2; которая измеряется интегралом:

$$L = S_{a12b} = \int_1^2 P dV, \text{ кДж.} \quad (4.3)$$

*Аналитическое выражение 1 закона термодинамики.*

*Энтальпия*

Если в произвольном процессе к 1 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:

$$\Delta u = u_2 - u_1, \text{ кДж,} \quad (4.4)$$

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

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

$$q = u_2 - u_1 + l, \text{ кДж/кг.} \quad (4.5)$$

Уравнение (4.5) 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:

$$dq = du + P \cdot dV. \quad (4.6)$$



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:

$$i = u + Pv, \text{ кДж/кг.} \quad (4.7)$$

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:

$$dq = di - v \cdot dP, \text{ кДж/кг.} \quad (4.8)$$

### Задание

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

### Порядок расчета

**I. Процесс, протекающий при постоянном давлении ( $P = const$ ) и нелинейной зависимости теплоемкости от температуры**

1. Определяем изменение внутренней энергии газа:

$$\Delta U = M \cdot C_{vm}(t_2 - t_1), \text{ кДж,} \quad (4.9)$$

где  $M$  – масса газа, кг;

$C_{vm}$  – средняя массовая теплоемкость газа при постоянном объеме.

$$C_{vm} = \frac{C_{vm}^{t_2} \cdot t_2 - C_{vm}^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1} = \frac{C_{vm2} \cdot t_2 - C_{vm1} \cdot t_1}{t_2 - t_1}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \quad (4.10)$$

где  $C_{vm2}$ ,  $C_{vm1}$  – средние массовые изохорные теплоемкости, определяемые по таблице В2 (Приложение В) при соответствующих температурах  $t_2$  и  $t_1$ .

2. Количество подведенной теплоты:

$$Q_P = M \cdot \Delta i = M \cdot C_{Pm}(t_2 - t_1), \text{ кДж,} \quad (4.11)$$

где  $C_{Pm}$  – средняя массовая теплоемкость газа при постоянном давлении, определяемая по таблице В1 (Приложение В) или по уравнению Майера:

$$C_{Pm} = C_{vm} + R, \quad (4.12)$$

где  $R$  – газовая постоянная данного газа, находится по таблице А1.

3. Изменение энтальпии в изобарном процессе равно количеству подводимой теплоты:

$$\Delta I = Q_P = M \cdot C_{Pm}(t_2 - t_1), \text{ кДж}, \quad (4.13)$$

где  $C_{Pm}$  – средняя массовая теплоемкость газа при постоянном давлении, определяемая по таблице В1 (Приложение В) или по уравнению Майера.

4. Работа расширения:

$$L = M \cdot R(t_2 - t_1) = P(V_2 - V_1), \text{ кДж}. \quad (4.14)$$

**II. Процесс, протекающий при ( $P = const$ ) и линейной зависимости теплоемкости от температуры**

$Q_P$ ;  $\Delta I$ ;  $\Delta U$  и  $L$  – определяются по тем же формулам, как и при нелинейной зависимости теплоемкости от  $t$ .

Но  $C_{vm}$  и  $C_{Pm}$  – определяются по интерполяционным формулам, взятым из таблицы Г1 (Приложение Г) для каждого газа соответствующего процесса ( $P = const$ ).

В данные формулы вместо  $t$  подставляют сумму температур начала и конца процесса, т.е.  $t = t_1 + t_2$ .

**III. Процесс, протекающий при постоянном объеме ( $v = const$ ) и нелинейной зависимости теплоемкости от температуры**

1. Определяем изменение внутренней энергии, равное количеству подведенной теплоты

$$\Delta U = Q_v = M \cdot C_{vm}(t_2 - t_1), \text{ кДж}, \quad (4.15)$$

где  $M$  – масса газа, кг;

$C_{vm}$  – средняя массовая теплоемкость при постоянном объеме.

$$C_{vm} = \frac{C_{vm0}^{t_2} \cdot t_2 - C_{vm0}^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1} = \frac{C_{vm2} \cdot t_2 - C_{vm1} \cdot t_1}{t_2 - t_1}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \quad (4.16)$$

где  $C_{vm2}$ ,  $C_{vm1}$  – средние массовые изохорные теплоемкости, определяемые по таблице В2 (Приложение В) при соответствующих температурах  $t_2$  и  $t_1$ .

2. Изменение энтальпии:

$$\Delta I = M \cdot \Delta i = M \cdot C_{Pm}(t_2 - t_1), \text{ кДж}, \quad (4.17)$$

где  $C_{Pm}$  – средняя массовая теплоемкость при постоянном давлении.

$$C_{Pm} = \frac{C_{Pm0}^{t_2} \cdot t_2 - C_{Pm0}^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1} = \frac{C_{Pm2} \cdot t_2 - C_{Pm1} \cdot t_1}{t_2 - t_1}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \quad (4.18)$$

где  $C_{Pm2}$ ,  $C_{Pm1}$  – средние массовые изобарные теплоемкости, определяемые по таблице В1 (Приложение В) при соответствующих температурах  $t_2$  и  $t_1$ .

3. Работа расширения

$L = 0$ , т.к. в изохорном процессе работа расширения не совершается ( $v = const$ ), а вся подводимая теплота идет на изменение внутренней энергии.

**IV. Процесс, протекающий при ( $v = const$ ) и линейной зависимости теплоемкости от температуры**

$Q_v$ ;  $\Delta I$ ;  $\Delta U$  и  $L$  – определяются аналогично процессу при  $v = \text{const}$  и нелинейной зависимости.

Но  $C_{vm}$  и  $C_{pm}$  – определяются по интерполяционным формулам, взятым из таблицы Г1 (Приложение Г) для каждого газа соответствующего процесса ( $v = \text{const}$ ).

**Таблица 4.1- Расчетные данные**

$P = const$					$v = const$				
№ вар	Газ	$M,$ кг	$t_1$ $^{\circ}C$	$t_2$ $^{\circ}C$	№ вар	Газ	$M,$ кг	$t_1$ $^{\circ}C$	$t_2$ $^{\circ}C$
1	CO <sub>2</sub>	10	100	800	17	CO <sub>2</sub>	6	120	500
2	CO	8	120	1200	18	O <sub>2</sub>	5	30	300
3	O <sub>2</sub>	6	30	600	19	N <sub>2</sub>	2	60	400
4	N <sub>2</sub>	5	50	800	20	воздух	12	80	500
5	воздух	2	100	350	21	H <sub>2</sub> O	10	100	450
6	H <sub>2</sub> O	12	20	900	22	SO <sub>2</sub>	8	150	300
7	SO <sub>2</sub>	10	30	400	23	H <sub>2</sub>	6	80	250
8	H <sub>2</sub>	6	50	1000	24	CO <sub>2</sub>	2	60	700
9	CO <sub>2</sub>	8	100	850	25	SO <sub>2</sub>	5	120	300
10	SO <sub>2</sub>	6	250	1000	26	H <sub>2</sub> O	8	160	800
11	H <sub>2</sub> O	10	60	200	27	N <sub>2</sub>	10	150	700
12	H <sub>2</sub>	3	20	1000	28	воздух	12	80	650
13	воздух	5	50	1200	29	O <sub>2</sub>	6	200	750
14	N <sub>2</sub>	8	100	720	30	CO	5	150	650
15	O <sub>2</sub>	10	120	900	31	CO <sub>2</sub>	10	30	480
16	CO	5	50	200	32	SO <sub>2</sub>	5	70	1000

**Контрольные вопросы**

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. В каком случае совершается работа расширения, а в каком сжатие?
6. Какая работа считается положительной, какая отрицательной?
7. Какая теплота считается положительной, какая отрицательной?
8. От чего зависит изменение энтальпии?
9. Охарактеризовать понятие энтальпии.
10. Пояснить физический смысл уравнения первого закона термодинамики, выраженного через энтальпию.
11. При изменении какого параметра можно определить совершается работа или нет?

Рекомендуемая литература:  
[ 1, с.51 ], [2, с.138]

## Практическая работа 5

### Расчет двигателя внутреннего сгорания

**Цель работы.** Определение коэффициента полезного действия двигателя внутреннего сгорания.

#### 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 5.1 и 5.2

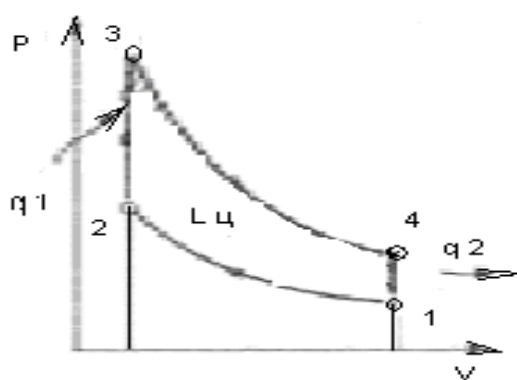


Рисунок 5.1 -  $P, V$ -диаграмма цикла ДВС с подводом теплоты при постоянном объеме.

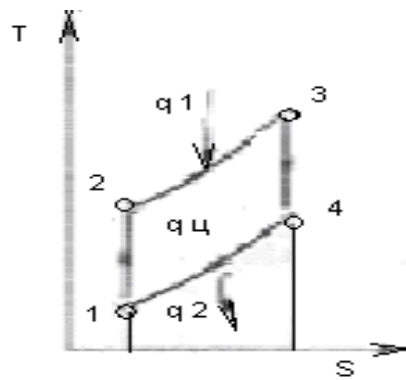


Рисунок 5.2 -  $TS$  -диаграмма цикла

При движении поршня справа налево, происходит адиабатное сжатие газа 1-2 и его объем 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:*

$$l_{\text{ц}} = l_1 - l_2, \text{ кДж}$$

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

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

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 крайнее положение. Это может привести к аварии.

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

### Задание

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. Данные для расчета указаны в таблицах 5.1; 5.2; 5.3; 5.4.

### Порядок выполнения

1) Начальный объем  $V_1, \text{ м}^3/\text{кг}$  в точке 1 определяется по формуле:

$$V_1 = \frac{RT_1}{P_1}$$

2) Конечный объем  $V_2, \text{ м}^3/\text{кг}$  в точке 2:

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

3) Давление  $P_2, \text{ МПа}$  в т.2:

$$P_2 = P_1 \cdot \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^k$$

2) Температура  $T_2, ^\circ K$  в т.2:

$$T_2 = \frac{P_2 \cdot V_2}{R}$$

3) Давление  $P_3, МПа$  в т.3:

$$P_3 = \lambda \cdot P_2$$

4) Температура в т.3:

$$T_3 = \lambda \cdot T_2$$

5) Давление в т.4:

$$P_4 = \frac{P_3}{\left( \frac{V_4}{V_3} \right)^k}$$

6) Температура  $T_4, ^\circ K$  в т.4:

$$T_4 = T_1 \frac{P_4}{P_1}$$

7) Массовая теплоемкость  $C_v, КДж/кгК$  :

$$C_v = \frac{\mu C_v}{\mu}$$

8) Количество подведенной теплоты  $q_1, КДж/кг$  :

$$q_1 = C_v \cdot (T_3 - T_2)$$

9) Количество отведенной теплоты:

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

10) Термический КПД цикла:

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

Таблица 5.1-Данные к задаче для вариантов 1-8

Рабочее тело	$P_1, МПа$	$t_1, ^\circ C$	$\varepsilon$	$\lambda$	$R, КДж/кгК$	$k$
$CO_2$	0,2	28	5	1,2	188,9	1,29

Таблица 5.2-Данные к задаче для вариантов 9-17

Рабочее тело	$P_1, МПа$	$t_1, ^\circ C$	$\varepsilon$	$\lambda$	$R, КДж/кгК$	$k$
$CO$	0,3	29	6	1,3	296,8	1,4

Таблица 5.3-Данные к задаче для вариантов 17-25

Рабочее тело	$P_1, МПа$	$t_1, ^\circ C$	$\varepsilon$	$\lambda$	$R, КДж/кгК$	$k$
$CO_2$	0,4	30	7	1,4	188,9	1,29

Таблица 5.4-Данные к задаче для вариантов 25-32

Рабочее тело	$P_1$ , МПа	$t_1$ °С	$\varepsilon$	$\lambda$	R, кДж/кгК	k
Воздух	0,5	32	8	1,5	287	1,4

### Контрольные вопросы

1. Дать определение двигателя внутреннего сгорания.
2. Из каких термодинамических процессов состоит циклы ДВС с подводом теплоты при постоянном объеме.
3. Из каких термодинамических процессов состоит циклы ДВС с подводом теплоты при постоянном давлении.
4. Из каких термодинамических процессов состоит циклы ДВС со смешанным подводом теплоты.
5. Что собой представляет индикаторная диаграмма циклов ДВС.

### Рекомендуемая литература:

[ 1, с.75-81], [ 2, с.137].



## Список используемой 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.: Metallургия, 2013 г. – 686 с.: ил.
- 5 Краснощеков Е.А., Сухомел А.С. Задачник по теплопередаче. – М.: Энергия, 2013.- 176 с.: ил.

## Приложение А

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

<i>Вещество</i>	<i>Химическое обозначение</i>	<i>Молекулярная масса <math>\mu</math></i>	<i>Плотность <math>\rho</math>, кг/м<sup>3</sup></i>	<i>Объем киломоля <math>\mu</math>, м<sup>3</sup>/кг</i>	<i>Газовая Постоянная R, Дж/(кгК)</i>
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
Окись 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 Б1- Формулы для расчета газовых смесей

Задание состава смеси	Перевод из одного состава в другой	Плотность и удельный объем смеси	Кажущаяся молекулярная масса смеси	Газовая постоянная смеси	Парциальное давление
Массовым и долями	$r_i = \frac{\frac{m_i}{\mu_i}}{\sum_1^n \frac{m_i}{\mu_i}}$	$\nu_{CM} = \sum_1^n \frac{m_i}{\rho_i}$ $\rho_{CM} = \frac{1}{\sum_1^n \frac{m_i}{\rho_i}}$	$\mu_{CM} = \frac{1}{\sum_1^n \frac{m_i}{\mu_i}}$	$R_{CM} = \sum_1^n m_i R_i$	$p_i = m_i \cdot \frac{R_i}{R_{CM}} p$
Объемным и долями	$m_i = \frac{r_i \mu_i}{\sum_1^n r_i \mu_i}$	$\rho_{CM} = \sum_1^n r_i \rho_i$ $\nu_{CM} = \frac{1}{\sum_1^n r_i \rho_i}$	$\mu_{CM} = \sum_1^n r_i \mu_i$	$R_{CM} = \frac{8314}{\sum_1^n r_i \mu_i}$	$p_i = r_i p$

## Приложение В

**Таблица В1-Средняя массовая теплоемкость газов при постоянном давлении от 0°С до t°С с<sub>рт</sub>, кДж/(кг К)**

t, °C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Воздух	H <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>
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 В2- Средняя массовая теплоемкость газов при постоянном объеме от 0°С до t°С с<sub>вт</sub>, кДж/(кг К)**

t, °C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Воздух	H <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>
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 В3-Средняя объемная теплоемкость газов при постоянном давлении от 0°С до t°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 В4-Средняя объемная теплоемкость газов при постоянном объеме от 0°С до t°С  $c'_{вт}$ , кДж/(м<sup>2</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 Г

**Таблица Г1-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>	$c_{pm} = 0,9127 + 0,00012724 t$ $c_{vm} = 0,6527 + 0,00012724 t$	$c'_{pm} = 1,3046 + 0,00018183 t$ $c'_{vm} = 0,9337 + 0,00018183 t$
N <sub>2</sub>	$c_{pm} = 1,0258 + 0,00008382 t$ $c_{vm} = 0,7289 + 0,00008382 t$	$c'_{pm} = 1,2833 + 0,00010492 t$ $c'_{vm} = 0,9123 + 0,00010492 t$
CO	$c_{pm} = 1,0304 + 0,00009575 t$ $c_{vm} = 0,7335 + 0,00009575 t$	$c'_{pm} = 1,2883 + 0,00011966 t$ $c'_{vm} = 0,9173 + 0,00011966 t$
Воздух	$c_{pm} = 0,9952 + 0,00009349 t$ $c_{vm} = 0,7084 + 0,00009349 t$	$c'_{pm} = 1,2870 + 0,00012091 t$ $c'_{vm} = 0,9161 + 0,00012091 t$
H <sub>2</sub> O	$c_{pm} = 1,8041 + 0,00029278 t$ $c_{vm} = 1,3783 + 0,00029278 t$	$c'_{pm} = 1,4800 + 0,00023551 t$ $c'_{vm} = 1,1091 + 0,00023551 t$
S <sub>2</sub> O	$c_{pm} = 0,6314 + 0,00015541 t$ $c_{vm} = 0,5016 + 0,00015541 t$	$c'_{pm} = 1,8472 + 0,00004547 t$ $c'_{vm} = 1,4763 + 0,00004547 t$
<i>В пределах от 0 до 1500<sup>0</sup>С</i>		
H <sub>2</sub>	$c_{pm} = 14,2494 + 0,00059574 t$ $c_{vm} = 10,1241 + 0,00059574 t$	$c'_{pm} = 1,2803 + 0,00005355 t$ $c'_{vm} = 0,9094 + 0,00005355 t$
CO <sub>2</sub>	$c_{pm} = 0,8725 + 0,00024053 t$ $c_{vm} = 0,6837 + 0,00024053 t$	$c'_{pm} = 1,7250 + 0,00004756 t$ $c'_{vm} = 1,3540 + 0,00004756 t$