

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Казанский национальный исследовательский технологический университет  
Бугульминский филиал**

## **ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКЕ**

**Методические указания  
к выполнению практических работ**

**Бугульма  
2014**

УДК 514  
ББК 30.11  
М 24

Составитель доц. И.А. Мутугуллина

Практические занятия по Технической термодинамике: метод. указания / И.А. Мутугуллина. – Бугульма: , 2014. – 26 с.

Составлены в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования по направлению 151000.62 «Технологические машины и оборудование», учебным планом и рабочей программой по дисциплине.

Рассмотрены основные расчетные формулы по изучаемым темам, даны варианты задач.

Предназначены для студентов очной и заочной форм обучения, изучающих дисциплины «Техническая термодинамика и теплотехника», «Термодинамика», «Теплотехника»

Подготовлены на кафедре технологических машин и оборудования БФ ФГБОУ ВПО «КНИТУ».

Печатаются по решению методической комиссии Бугульминского филиала ФГБОУ ВПО «КНИТУ».

Рецензенты:

к.т.н., заведующий кафедрой ХТОМ БФ ФГБОУ ВПО «КНИТУ» Дмитриева А.Ю.

к.т.н., заведующий лабораторией техники и технологии глубокой очистки воды ООО «НТЦ Татнефть» Буслаев Е.С.

© Мутугуллина И.А.

## ВВЕДЕНИЕ

Термодинамика наука о превращениях различных видов энергии из одного в другой, и о наиболее общих макроскопических свойствах материи. Она изучает различные как физические, так и химические явления, обусловленные превращениями энергии. Применение закономерностей термодинамики позволяет анализировать свойства веществ, предсказывать их поведение в различных условиях. Термодинамика дает возможность исследовать различные процессы от простых в однородных средах до сложных с физическими и химическими превращениями, биологических и др.

Слово «термодинамика» происходит от греч. «therme» – тепло и «dynamis» – сила. Название науки возникло в период ее основания – в начале XIX в. В настоящее время слово «термодинамика» трактуют так: наука «о силах, связанных с теплотой».

Термодинамика основана на двух, экспериментально установленных законах (началах).

**Первый закон** (начало) является по существу законом преобразования и сохранения энергии применительно к процессам, изучаемым в термодинамике; невозможен процесс возникновения или исчезновения энергии.

**Второй закон** (начало) – определяет направление течения реальных (неравновесных) процессов; невозможен процесс, имеющий единственным своим результатом превращение теплоты в работу.

**Термодинамический метод** исследования основан на законах (началах) термодинамики и представляет собой их логическое и математическое развитие.

Объект исследования в термодинамике называют **термодинамической системой** или, в простом случае, **термодинамическим телом**. Одна из особенностей метода термодинамики состоит в том, что система (тело) противопоставляется всем другим телам, которые называют окружающей средой. Термодинамика построена дедуктивно: частные выводы получены из общих законов (начал).

Принято разделять термодинамику на физическую, или общую, химическую и техническую.

**Физическая термодинамика** разрабатывает метод термодинамики и применяет его для изучения фазовых превращений термоэлектрических и магнитных явлений, излучения, поверхностных явлений и т. п.

**Химическая термодинамика** изучает процессы с физическими и химическими превращениями с помощью метода термодинамики.

**Техническая термодинамика** устанавливает закономерности взаимного преобразования теплоты и работы, для чего изучает свойства газов и паров (рабочих тел) и процессы изменения их состояния; устанавливает взаимосвязь между тепловыми, механическими и химическими процессами, протекающими в тепловых двигателях и холодильных установках. Одна из основных ее задач – отыскание наиболее рациональных способов взаимного превращения теплоты, и работы.

Знание термодинамики, ее исходных идей, ее универсального метода, строгого и эффективного математического аппарата является необходимой предпосылкой подготовки инженера.

Термодинамика играет важную роль в развитии научного мышления и формировании материалистического мировоззрения.

Практическое занятие №1  
Тема: **Параметры состояния**  
**Основные формулы**

### 1. Давление

**Давление** - физическая величина, равная отношению силы, равномерно распределенной по поверхности тела, к площади поверхности, расположенной перпендикулярно силе:  $p = F/s$ .

Давление  $p$  можно измерить двумя приборами; давление, превышающее атмосферное, измеряют барометром ( $p_{\text{аб}}$ ) и манометром  $p_1$  и, причем

$$p = p_{\text{аб}} + p_1$$

а давление, меньшее атмосферного (разрежение), — вакуумметром и барометром, причем

$$p_{\text{в}} = p_{\text{аб}} - p_{\text{в}}$$

Единица давления в СИ - паскаль (Па),  $1 \text{ Н/м}^2 = 1 \text{ Па}$ .

### 2. Температура

**Температура** характеризует тепловое состояние тела, или, как иногда говорят, степень нагретости тела.

Связь между температурами по шкале Кельвина ( $T, \text{ К}$ ) и Цельсия ( $t, ^\circ\text{C}$ ) имеет вид  $T = 273,15 + t$ .

### 3. Удельный объем, плотность.

**Удельный объем** - физическая величина, равная отношению объема вещества к его массе:  $v = V/m$ .

Единица СИ удельного объема -  $\text{м}^3/\text{кг}$ .

**Плотностью** называется количество вещества, заключенное в единице объема:  $\rho = m/V$ .

Соответственно удельный объем – величина обратная плотности.

### Соотношение между единицами давления

| Наименование единицы   | Ньютон на квадратный метр, Па | Бар                     | Килограмм-сила на квадратный метр, кгс/м <sup>2</sup> | Физическая атмосфера, атм | Миллиметр водяного столба, мм.вод.ст. | Миллиметр ртутного столба, мм.рт.ст. | Английский фунт на квадратный дюйм, ibf/in <sup>2</sup> |
|------------------------|-------------------------------|-------------------------|---|---------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|---|
| 1 Па                   | 1                             | $1 \cdot 10^{-5}$       | 1,101972  | $0,98692 \cdot 10^{-5}$   | 0,101972                              | $750,06 \cdot 10^{-5}$               | $14,5038 \cdot 10^{-5}$                                 |
| 1 бар                  | $10^5$                        | 1                       | 10197,2   | 0,98692                   | 10197,2                               | 750,06                               | 14,5038   |
| 1 кгс/м <sup>2</sup>   | 9,80665                       | $9,80665 \cdot 10^{-5}$ | 1   | $0,96784 \cdot 10^{-4}$   | 1                                     | $735,55 \cdot 10^{-4}$               | $14,2233 \cdot 10^{-4}$                                 |
| 1 атм                  | $1,01325 \cdot 10^5$          | 1,01325                 | $1,03323 \cdot 10^4$                                  | 1                         | $1,03323 \cdot 10^4$                  | 760                                  | 14,6959   |
| $10^4$ мм.вод.ст       | $0,980665 \cdot 10^5$         | 0,98066                 | $10^4$  | 0,96784                   | $10^4$                                | 735,55                               | 14,2233   |
| $10^3$ мм.рт.ст.       | $1,33322 \cdot 10^5$          | 1,33322                 | $1,35951 \cdot 10^4$                                  | $1,31579 \cdot 10^4$      | $1,35951 \cdot 10^4$                  | $10^3$                               | 19,3368   |
| 10 ibf/in <sup>2</sup> | $0,68948 \cdot 10^5$          | 0,68948                 | $0,70307 \cdot 10^4$                                  | 0,68046                   | $0,70307 \cdot 10^4$                  | 517,15                               | 10  |

#### Задача №1

Выразите через другие единицы измерения: 760 мм.рт.ст., 10МПа, 15 ibf/in<sup>2</sup>.

#### Задача №2

Манометр, установленный в открытой кабине самолета, находящегося на земле, и измеряющий давление масла, показывает 6 Н/см<sup>2</sup> при показании барометра 752 мм.рт.ст.

Каково абсолютное давление масла, выраженное в ньютонах на квадратный метр, мегапаскалях, килограмм-силах на квадратный метр, килограмм-силах на квадратный сантиметр, миллиметрах ртутного столба, миллиметрах водяного столба, английских фунт - силах на квадратный дюйм?

Каковы будут показания манометра в этих единицах после подъема самолета на некоторую высоту, где атмосферное давление 442,5 мм.рт.ст., если абсолютное давление остается неизменным?

#### Задача №3

Масса 1 м<sup>3</sup> метана при определенных условиях составляет 0,7 кг. Определить плотность и удельный объем метана при этих условиях.

#### Задача №4

Плотность воздуха при определенных условиях равна  $1,293 \text{ кг/м}^3$ . Определить удельный объем воздуха при этих условиях.

#### Задача №5

В сосуде объемом  $0,9 \text{ м}^3$  находится  $1,5 \text{ кг}$  окиси углерода. Определить удельный объем и плотность окиси углерода при указанных условиях.

#### Задача №6

Определить абсолютное давление в паровом котле, если манометр показывает  $0,245 \text{ МПа}$ , а атмосферное давление по ртутному барометру составляет  $p_1 \text{ ат} = 93\,325 \text{ Па}$  ( $700 \text{ мм рт. ст.}$ ) при  $t = 20^\circ \text{C}$ .

### Практическое занятие №2

#### Тема: Уравнение состояния идеальных газов

#### Основные формулы

##### 1. Уравнение Клапейрона

$$pv = RT$$

$$p = \rho RT$$

$p$  - давление,

$v$  - удельный объем,

$R$  - удельная газовая постоянная [ $\text{Дж/кг} \cdot \text{K}$ ],

$T$  - температура.

##### 2. Уравнение Менделеева - Клапейрона

$$pV = \frac{m}{\mu} R_{\mu} T$$

$$p = \rho \frac{R_{\mu}}{\mu} T$$

$\mu$  - молярная масса [ $\text{кг/моль}$ ],

$R_{\mu}$  - универсальная газовая постоянная [ $\text{Дж/моль} \cdot \text{K}$ ].

Нормальные физические условия:  $T = 273,15 \text{ К}$ ,

$$p = 101325 \text{ Па},$$

молярный объем любого газа

$$V_{\mu} = 22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль}.$$

Универсальная газовая постоянная:

$$R_{\mu} = pV_{\mu}/T = 101325 \cdot 22,4 / 273,15 = 8,314 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}.$$

Удельная газовая постоянная:  $R = R_{\mu}/\mu$ .

### Задача №1

Определите плотность воздуха и водорода при нормальных условиях.

### Задача №2

Определите удельный объем кислорода при давлении 2,3 МПа и температуре 280°C.

### Задача №3

Определите массу воздуха, находящегося в комнате площадью 25 м<sup>2</sup> и высотой 3,2 м. Принять, что температура воздуха в комнате 22°C, а давление 986,5 гПа.

### Задача №4

Определите плотности азота при давлениях 1 и 6 МПа. Температура азота 400°C.

### Задача №5

В комнате площадью 35 м<sup>2</sup> и высотой 3,1 м воздух находится при 23°C и давлении 973 гПа. Какое количество воздуха проникнет с улицы в комнату, если давление увеличится до 1013 гПа. Температура воздуха остается постоянной.

### Задача №6

При температуре 800°C и давлении 0,1 МПа плотность газа  $\rho = 0,447 \text{ кг/м}^3$ . Что это за газ?

### Задача №7

Определить плотность окиси углерода (CO) при  $p = 0,1 \text{ МПа}$  и  $t = 15^\circ\text{C}$ .

### **Задача №8**

Найти плотность и удельный объем двуокиси углерода ( $\text{CO}_2$ ) при нормальных условиях.

### **Задача №9**

Плотность воздуха при нормальных условиях  $\rho = 1,293 \text{ кг/м}^3$ . Чему равна плотность воздуха при давлении  $\rho = 1,5 \text{ МПа}$  и температуре  $t = 20^\circ\text{C}$ .

### **Задача №10**

Найти газовую постоянную для кислорода, водорода и метана ( $\text{CH}_4$ ).

### **Задача №11**

Определить массу кислорода, содержащегося в баллоне емкостью 60л, если давление кислорода по манометру равно 1,08 МПа, а показание ртутного барометра – 99 325 Па при температуре  $25^\circ\text{C}$ .

### **Задача №12**

Какой объем занимают 10 кмоль азота при нормальных условиях?

### **Задача №13**

Какова будет плотность окиси углерода при  $t = 20^\circ\text{C}$  и  $\rho = 94,7 \text{ кПа}$ , если при  $0^\circ\text{C}$  и 101,3 кПа она равна  $1,251 \text{ кг/м}^3$ ?

## **Практическое занятие №3**

### **Тема: Смеси идеальных газов**

#### **Основные формулы**

#### **1. Массовые доли**

$$g_i = m_i / m_{см}$$



## 2. Молярные доли

$$y_i = v_i / v_{см}$$

## 3. Объемные доли

$$r_i = V_i / V, \quad r_i = y_i$$

## 4. Соотношения долей

$$r_i = \frac{g_i / \rho_i}{\sum g_i / \rho_i} = \frac{g_i / \mu_i}{\sum g_i / \mu_i},$$

$$g_i = \frac{\mu_i r_i}{\sum \mu_i r_i}.$$

## 5. Молярная масса смеси

$$\mu_{см} = m_{см} / v_{см}, \quad \mu_{см} = \sum y_i \mu_i, \quad \mu_{см} = \frac{1}{\sum g_i / \mu_i}.$$

## 6. Удельная газовая постоянная смеси

$$R_{см} = \frac{R_{\mu}}{\mu_{см}} = \sum g_i R_i$$

## 7. Уравнение Дальтона

$$\sum p_i = p_{см}$$

## 8. Уравнение состояния идеально-газовой смеси

$$p_{см} V_{см} = m_{см} R_{см} T_{см},$$

$$p_{см} v_{см} = R_{см} T_{см}$$

## 9. Парциальное давление смеси

$$p_i = p_{см} y_i = p_{см} r_i.$$

### Задача №1

Смесь 10 кг кислорода и 15 кг азота имеет давление 0,3 МПа и температуру 27<sup>0</sup>С. Определите: молярные доли каждого газа в смеси, относительную молекулярную массу смеси, удельную газовую постоянную, общий объем смеси, парциальные давления и объемы.

### Задача №2

Воздух, если считать, что он является смесью только азота и кислорода, имеет следующий объемный состав:  $r_{N_2} = 79\%$ ,  $r_{O_2} = 21\%$ . Определите массовые доли азота и кислорода в воздухе. Вычислите газовую постоянную воздуха.

### Задача №3

В сосуде находится смесь газов, образовавшаяся в результате смешения 10 кг азота, 13 кг аргона и 27 кг диоксида углерода. Определите молярные доли смеси, ее удельный объем при нормальных условиях, молярную массу смеси и газовую постоянную, отнесенную к одному кубическому метру при нормальных условиях.

### Задача №4

Смесь газов, образовавшаяся при сжигании 1 кг мазута в топке парового котла, имеет состав, определенный парциальными объемами составляющих:  $V_{CO_2} = 1,85 \text{ м}^3$ ,  $V_{O_2} = 0,77 \text{ м}^3$ ,  $V_{N_2} = 12,78 \text{ м}^3$ . Определите массовые доли и парциальные давления составляющих, если общее давление 0,1 МПа.

### Задача №5

Генераторный газ имеет следующий объемный состав:  $H_2 = 7,0 \%$ ;  $CH_4 = 2,0 \%$ ;  $CO = 27,6 \%$ ;  $CO_2 = 4,8 \%$ ;  $N_2 = 58,6 \%$ .

Определить массовые доли, кажущуюся молекулярную массу, газовую постоянную, плотность и парциальные давления при  $15^\circ\text{C}$  и 0,1 МПа.

### Задача №6

Массовый состав смеси следующий:  $CO_2 = 18 \%$ ;  $O_2 = 12 \%$  и  $N_2 = 70 \%$ .

До какого давления нужно сжать эту смесь, находящуюся при нормальных условиях, чтобы при  $t = 180^\circ\text{C}$  8 кг ее занимали объем, равный  $4 \text{ м}^3$ .

### Задача №7

Найти газовую постоянную, удельный объем газовой смеси и парциальные давления ее составляющих, если объемный состав смеси следующий:  $CO_2 = 12 \%$ ;  $CO = 1 \%$ ;  $H_2O = 6\%$ ;  $O_2 = 7 \%$ ;  $N_2 = 74 \%$ , а общее давление ее  $p = 100 \text{ кПа}$ .

## Практическое занятие №4

### Тема: Теплоемкость газов

#### Основные формулы

**Теплоемкостью** называют количество теплоты, которое необходимо сообщить телу (газу), чтобы повысить температуру какой-либо количественной единицы на 1 °С.

В зависимости от выбранной количественной единицы вещества различают мольную теплоемкость  $\tilde{n}$  – кДж/(кмоль · К), массовую теплоемкость  $c$  – кДж/(м<sup>3</sup> · К) и объемную теплоемкость  $c'$  – кДж/(м<sup>3</sup> · К).

Для определения значений перечисленных выше теплоемкостей достаточно знать величину одной какой-либо из них. Удобнее всего иметь величину мольной теплоемкости. Тогда массовая теплоемкость

$$c = \frac{\mu c}{\mu},$$

а объемная теплоемкость

$$c' = \frac{\mu c}{22,4}.$$

Объемная и массовая теплоемкости связаны между собой зависимостью

$$\tilde{n}' = \tilde{n} \rho_1$$

где  $\rho_1$  – плотность газа при нормальных условиях.

Теплоемкость газа зависит от его температуры. По этому признаку различают **среднюю и истинную теплоемкость**.

Если  $q$  – количество теплоты, сообщаемой единице количества газа (или отнимаемого от него) при изменении температуры газа от  $t_1$  и  $t_2$  (или, что то же, от  $T_1$  до  $T_2$ ), то

$$c_m = \frac{q}{t_2 - t_1}$$

представляет собой среднюю теплоемкость в пределах  $t_1 - t_2$ . Предел этого отношения, когда разность температур стремится к нулю, называют истинной теплоемкостью. Аналитически последняя определяется как

$$c = \frac{dq}{dt}.$$

Теплоемкость идеальных газов зависит не только от их атомности и характера процесса. Теплоемкость реальных газов зависит от их природных свойств, характера процесса, температуры и давления.

Для газов особо важное значение имеют следующие два случая нагревания (охлаждения):

- 1) изменение состояния при постоянном объеме;
- 2) изменение состояния при постоянном давлении.

Обоим этим случаям соответствуют различные значения теплоемкостей.

Таким образом, различают истинную и среднюю теплоемкости:

- а) мольную – при постоянном объеме ( $\tilde{n}_v$  и  $\tilde{n}_{vm}$ ) и постоянном давлении ( $\tilde{n}_p$  и  $\tilde{n}_{pm}$ );
- б) массовую – при постоянном объеме ( $c_v$  и  $c_{vm}$ ) и постоянном давлении ( $c_p$  и  $c_{pm}$ ).
- в) объемную – при постоянном объеме ( $c'_v$  и  $c'_{vm}$ ) и постоянном давлении ( $c'_p$  и  $c'_{pm}$ ).

Между теплоемкостями при постоянном давлении и постоянном объеме существует следующая зависимость – уравнение Майера

$$c_p - c_v = R \text{ или } \tilde{c}_p - \tilde{c}_v = R_\mu$$

и показатель адиабаты

$$k = \frac{c_p}{c_v} = \frac{\tilde{c}_p}{\tilde{c}_v}.$$

Молярная теплоемкость газов по молекулярно-кинетической теории

$$\tilde{c}_v = \mu c_v = \frac{j R_\mu}{2},$$

где  $j$  – общее число степеней свободы поступательных и вращательных движений.

Теплоемкость газов изменяется с изменением температуры, причем эта зависимость имеет криволинейный характер. В таблицах приведены теплоемкости для наиболее часто встречающихся в теплотехнических расчетах двух- и трехатомных газов.

При пользовании таблицами значения истинных теплоемкостей, а также средних теплоемкостей в пределах от  $0^\circ \text{C}$  до  $t$  берут непосредственно из таблиц, причем в необходимых случаях производится интерполирование.

### Теплоемкость идеальных газов по молекулярно-кинетической теории

| Газы  | Число степеней свободы |              | $\tilde{c}_v$       | $\tilde{c}_p$       | $k = \frac{c_p}{c_v}$ |
|---|------------------------|--------------|---------------------|---------------------|-----------------------|
|   | Поступательное         | Вращательное |                     |                     |                       |
| Одноатомные молекулы                              | 3                      | -            | $\frac{3}{2} R_\mu$ | $\frac{5}{2} R_\mu$ | 1,67                  |
| Двухатомные молекулы                              | 3                      | 2            | $\frac{5}{2} R_\mu$ | $\frac{7}{2} R_\mu$ | 1,4                   |
| Трехатомные с линейной молекулы                   | 3                      | 2            | $\frac{5}{2} R_\mu$ | $\frac{7}{2} R_\mu$ | 1,4                   |
| Трехатомные с нелинейной молекулой и многоатомные | 3                      | 3            | $\frac{6}{2} R_\mu$ | $\frac{8}{2} R_\mu$ | 1,33                  |

Нелинейную зависимость истинной теплоемкости от температуры представляют обычно уравнением вида

$$c = a + bt + dt^2,$$

где  $a$ ,  $b$  и  $d$  – величины, постоянные для данного газа.

Часто в теплотехнических расчетах нелинейную зависимость теплоемкости от температуры заменяют близкой к ней линейной зависимостью. В этом случае истинная теплоемкость

$$c = a + bt,$$

а средняя теплоемкость при изменении температуры от  $t_1$  до  $t_2$

$$c_m = a + \frac{b}{2}(t_1 + t_2),$$

где  $a$  и  $b$  – постоянные для данного газа.

Для средней теплоемкости в пределах  $0^\circ \text{C} - t$  эта формула принимает вид

$$c_m = a + \frac{b}{2}t.$$

Далее приведены интерполяционные формулы для истинных и средних мольных теплоемкостей при постоянном давлении и для средних массовых объемных теплоемкостей при постоянном объеме.

Теплоемкость газовой смеси

$$\text{массовая } c_{cm} = \sum_1^n m_i c_i; \text{ объемная } c'_{cm} = \sum_1^n r_i c'_i; \text{ мольная } \tilde{c}_{ci} = \sum_1^n r_i \tilde{c}_i$$

Интерполяционные формулы для истинных и средних мольных теплоемкостей газов

| Газ                         | Мольная теплоемкость при $p = \text{const}$ в кДж/(кмоль·К) |   |
|-----------------------------|---|---|
|                             | истинная  | средняя                                 |
| В пределах 0 – 1 000° С     |   |   |
| O <sub>2</sub>              | $\tilde{n}_p = 29,5802 + 0,0069706t$                        | $\tilde{n}_{pm} = 29,2080 + 0,0040717t$ |
| N <sub>2</sub>              | $\tilde{n}_p = 28,5372 + 0,0053905t$                        | $\tilde{n}_{pm} = 28,7340 + 0,0023488t$ |
| CO                          | $\tilde{n}_p = 28,7395 + 0,0058862t$                        | $\tilde{n}_{pm} = 28,8563 + 0,0026808t$ |
| Воздух                      | $\tilde{n}_p = 28,7558 + 0,0057208t$                        | $\tilde{n}_{pm} = 28,8270 + 0,0027080t$ |
| H <sub>2</sub> O            | $\tilde{n}_p = 32,8367 + 0,0116611t$                        | $\tilde{n}_{pm} = 33,1494 + 0,0052749t$ |
| SO <sub>2</sub>             | $\tilde{n}_p = 42,8728 + 0,0132043t$                        | $\tilde{n}_{pm} = 40,4386 + 0,0099562t$ |
| В пределах 0 – 1 500° С     |   |   |
| H <sub>2</sub>              | $\tilde{n}_p = 28,3446 + 0,0031518t$                        | $\tilde{n}_{pm} = 28,7210 + 0,0012008t$ |
| CO <sub>2</sub>             | $\tilde{n}_p = 41,3597 + 0,0144985t$                        | $\tilde{n}_{pm} = 38,3955 + 0,0105838t$ |
| В пределах 1 000 – 2 700° С |   |   |
| O <sub>2</sub>              | $\tilde{n}_p = 33,8603 + 0,021951t$                         | $\tilde{n}_{pm} = 31,5731 + 0,0017572t$ |
| N <sub>2</sub>              | $\tilde{n}_p = 32,7466 + 0,0016517t$                        | $\tilde{n}_{pm} = 29,7815 + 0,0016835t$ |
| CO                          | $\tilde{n}_p = 33,6991 + 0,0013406t$                        | $\tilde{n}_{pm} = 30,4242 + 0,0015579t$ |
| Воздух                      | $\tilde{n}_p = 32,9564 + 0,0017806t$                        | $\tilde{n}_{pm} = 30,1533 + 0,0016973t$ |
| H <sub>2</sub> O            | $\tilde{n}_p = 40,2393 + 0,0059854t$                        | $\tilde{n}_{pm} = 34,5118 + 0,0045979t$ |
| В пределах 1 500 – 3 000° С |   |   |
| H <sub>2</sub>              | $\tilde{n}_p = 31,0079 + 0,0020243t$                        | $\tilde{n}_{pm} = 28,6344 + 0,0014821t$ |
| CO <sub>2</sub>             | $\tilde{n}_p = 56,8768 + 0,0021738t$                        | $\tilde{n}_{pm} = 48,4534 + 0,0030032t$ |

Интерполяционные формулы для средних массовых и объемных теплоемкостей газов

| Газ                     | Теплоемкость в кДж/(кг·К)                |  |
|-------------------------|--|--|
|                         | массовая                                 | объемная                                 |
| В пределах 0 – 1 000° С |  |  |
| O <sub>2</sub>          | $c_{pm} = 0,9127 + 0,00012724t$          | $\tilde{n}'_{pm} = 1,3046 + 0,00018183t$ |
|                         | $c_{vm} = 0,6527 + 0,00012724t$          | $\tilde{n}'_{vm} = 0,9337 + 0,00018183t$ |
| N <sub>2</sub>          | $c_{pm} = 1,0258 + 0,0008382t$           | $\tilde{n}'_{pm} = 1,2833 + 0,00010492t$ |
|                         | $c_{vm} = 0,7289 + 0,0008382t$           | $\tilde{n}'_{vm} = 0,9123 + 0,00010492t$ |
| CO                      | $c_{pm} = 1,0304 + 0,0009575t$           | $\tilde{n}'_{pm} = 1,2833 + 0,00011966t$ |
|                         | $c_{vm} = 0,7335 + 0,0009575t$           | $\tilde{n}'_{vm} = 0,9173 + 0,00011966t$ |
| Воздух                  | $c_{pm} = 0,9952 + 0,0009349t$           | $\tilde{n}'_{pm} = 1,2870 + 0,00012091t$ |
|                         | $c_{vm} = 0,7084 + 0,0009349t$           | $\tilde{n}'_{vm} = 0,9161 + 0,00012091t$ |
| H <sub>2</sub> O        | $c_{pm} = 1,8401 + 0,00029278t$          | $\tilde{n}'_{pm} = 1,4800 + 0,00023551t$ |
|                         | $c_{vm} = 1,3783 + 0,00029278t$          | $\tilde{n}'_{vm} = 1,1091 + 0,00023551t$ |
| SO <sub>2</sub>         | $c_{pm} = 0,6314 + 0,00015541t$          | $\tilde{n}'_{pm} = 1,8472 + 0,00004547t$ |
|                         | $c_{vm} = 0,5016 + 0,00015541t$          | $\tilde{n}'_{vm} = 1,4763 + 0,00004547t$ |
| В пределах 0 – 1 500° С |  |  |
| H <sub>2</sub>          | $\tilde{n}_{pm} = 14,2494 + 0,00059574t$ | $\tilde{n}'_{pm} = 1,2803 + 0,00005355t$ |
|                         | $\tilde{n}_{vm} = 10,1241 + 0,00059574t$ | $\tilde{n}'_{vm} = 1,2803 + 0,00005355t$ |
| CO <sub>2</sub>         | $\tilde{n}_{pm} = 0,8725 + 0,00024053t$  | $\tilde{n}'_{pm} = 1,7250 + 0,00004756t$ |
|                         | $\tilde{n}_{vm} = 0,6837 + 0,00024053t$  | $\tilde{n}'_{vm} = 1,3540 + 0,00004756t$ |

**Задача №1**

Найти объемную теплоемкость кислорода при постоянном объеме и постоянном давлении, считая  $c = \text{const}$ .

### Задача №2

Определить значение массовой теплоемкости кислорода при постоянном объеме и постоянном давлении, считая  $c = \text{const}$ .

### Задача №3

Вычислить среднюю массовую и среднюю объемную теплоемкость окиси углерода при постоянном объеме для интервала температур 0–1200° С, если известно, что для окиси углерода  $(\mu c_m)_0^{1200} = 32,192 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$ .

Сопоставить полученные результаты с данными табл. 5.

### Задача №4

Вычислить среднюю теплоемкость  $c_{pm}$  для воздуха при постоянном давлении в пределах 200–800°С, считая зависимость теплоемкости от температуры нелинейной.

### Задача №5

Решить предыдущую задачу, считая зависимость теплоемкости от температуры линейной.

### Задача №6

Определить среднюю массовую теплоемкость  $c_{pm}$  для кислорода при постоянном давлении в пределах от 350 – 1 000° С, считая зависимость теплоемкости от температуры: а) нелинейной; б) линейной.

### Задача №7

Вычислить среднюю теплоемкость  $c_{pm}$  и  $c'_{vm}$  в пределах 200–800° С для СО, считая зависимость теплоемкости от температуры линейной.

### Задача №8

Найти среднюю теплоемкость  $c'_{pm}$  и  $c'_{vm}$  для воздуха в пределах 400 – 1200°С, считая зависимость теплоемкости от температуры нелинейной.



## Практическое занятие № 5

### Тема: Первый закон термодинамики

#### Основные формулы

### 1. Первый закон термодинамики

$$dQ = dU + dL = dU + p dV.$$

Для 1 кг рабочего тела это уравнение записывается так:

$$dq = du + dl, \text{ или } dq = du + p dv.$$

Так как  $U + pV = H$ , то

$$dQ = dH - V dp$$

или для 1 кг рабочего тела

$$dq = dh - v dp.$$

### 2. Работа, внутренняя энергия и теплота изотермического, изобарного, изохорного и адиабатного процессов

|                        | Теплота ( $q$ )                   | Работа ( $l$ )   | Внутренняя энергия ( $u$ )         |
|------------------------|-----------------------------------|--|------------------------------------|
| Изохорный процесс      | $dq = du$<br>$q = c_v(T_2 - T_1)$ | 0  | $dq = du$<br>$u = c_v(T_2 - T_1)$  |
| Изобарный процесс      | $dq = dh$<br>$q = c_p(T_2 - T_1)$ | $l = p(v_2 - v_1) =$<br>$= R(T_2 - T_1)$   | $u = c_v(T_2 - T_1)$               |
| Изотермический процесс | $dq = dl$                         | $l = RT \ln \frac{p_1}{p_2}$   | 0                                  |
| Адиабатный процесс     | 0                                 | $l = c_v(T_1 - T_2)$<br>для работы справедливы<br>формулы для политропного<br>процесса при $n = k$ | $du = -dl$<br>$u = c_v(T_2 - T_1)$ |

### 3. Изменение энтальпии идеального газа

$$h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1)$$

#### 4. Изменение энтальпии идеального газа

$$u_2 - u_1 = c_v(T_2 - T_1)$$

##### Задача №1

Сколько килограммов свинца можно нагреть от температуры  $15^{\circ}\text{C}$  до температуры его плавления  $t_{\text{пл}} = 327^{\circ}\text{C}$  посредством удара молота массой 200 кг при падении его с высоты 2 м?

Предполагается, что вся энергия падения молота превращается в теплоту, целиком поглощаемую свинцом.

Теплоемкость свинца  $c_p = 0,1256 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ .

##### Задача №2

Какова должна быть скорость свинцовой пули, чтобы при ударе о стальную плиту она полностью расплавилась?

Предполагается, что в момент удара температура пули равна  $27^{\circ}\text{C}$ . температура плавления свинца  $t_{\text{пл}} = 327^{\circ}\text{C}$ , теплота плавления  $r_{\text{пл}} = 20,934 \text{ кДж}/\text{кг}$ , а теплоемкость  $c_p = 0,1256 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ .

##### Задача №3

Какое количество теплоты необходимо подвести к воздуху, заключенному в сосуде объемом  $20 \text{ дм}^3$  при давлении 1 МПа и температуре  $20^{\circ}\text{C}$ , чтобы поднять его температуру до  $600^{\circ}\text{C}$ ?

##### Задача №4

В компрессоре газовой турбины сжимается воздух. Начальная температура воздуха  $30^{\circ}\text{C}$ , температура после сжатия  $150^{\circ}\text{C}$ . Определите изменение энтальпии и внутренней энергии воздуха в процессе сжатия по расчетам и используя таблицы.

##### Задача №5

В регенеративном подогревателе газовой турбины воздух нагревается при постоянном давлении от  $130^{\circ}\text{C}$  до  $500^{\circ}\text{C}$ . Определите количество теплоты, сообщенной воздуху в единицу времени, если его расход составляет  $250 \text{ кг}/\text{ч}$ .

### Задача №6

Найти изменение внутренней энергии  $2 \text{ м}^3$  воздуха, если температура его понижается от  $t_1 = 250^\circ \text{C}$  до. Зависимость теплоемкости от температуры принимать линейной. Начальное давление воздуха  $p_1 = 0,6 \text{ МПа}$ .

### Задача №7

1 кг воздуха при температуре  $30^\circ \text{C}$  и начальном давлении  $0,1 \text{ МПа}$  сжимается изотермически до конечного давления  $1 \text{ МПа}$ . Определить конечный объем, затрачиваемую работу и количество теплоты, отводимой от газа.

### Задача №8

К газу, заключенному в цилиндре с подвижным поршнем, подводится извне  $100 \text{ кДж}$  теплоты. Величина произведенной работы при этом составляет  $115 \text{ кДж}$ . Определить изменение внутренней энергии газа, если количество его равно  $0,8 \text{ кг}$ .

## Практическое занятие № 6

### Тема: Основные термодинамические процессы

#### Основные формулы

#### 1. Изохорный процесс ( $v = \text{const}$ )

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2},$$

$$dl = 0,$$

$$dq = du,$$

$$q = u_2 - u_1 = c_v(T_2 - T_1).$$

#### 2. Изобарный процесс ( $p = \text{const}$ )

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

$$dl = p dv,$$

$$l = p(v_2 - v_1) = R(T_2 - T_1),$$

$$q = h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1).$$

### 3. Изотермический процесс ( $T = const$ )

$$p_1 v_1 = p_2 v_2,$$

$$du = 0,$$

$$dq = dl,$$

$$q = l = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \ln \frac{p_2}{p_1}.$$

### 4. Адиабатный процесс

( $dq = 0$ ,  $q = 0$ ,  $c = 0$ ,  $k$  - показатель адиабаты,  $0 < k < +\infty$ )

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

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

$$p_2 v_2^k = p_1 v_1^k,$$

$$l = \frac{p_1 v_1}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = \frac{p_1 v_1}{k-1} \left[ 1 - \frac{T_2}{T_1} \right] = \frac{p_1 v_1}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} \right].$$

### 5. Политропный процесс

( $n$  - показатель политропы,  $-\infty < n < +\infty$ )

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

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

$$p_2 v_2^n = p_1 v_1^n,$$

$$l = \frac{p_1 v_1}{n-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] = \frac{p_1 v_1}{n-1} \left[ 1 - \frac{T_2}{T_1} \right] = \frac{p_1 v_1}{n-1} \left[ 1 - \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1} \right]$$

### Задача №1

Начальное состояние азота параметрами:  $t = 200^\circ\text{C}$ ,  $\nu = 1,9 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Азот нагревается при постоянном давлении, причем объем азота увеличивается до  $5,7 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Определите конечную температуру.

### Задача №2

В закрытом сосуде объемом  $0,8 \text{ м}^3$  находится диоксид углерода при давлении  $2,2 \text{ МПа}$  и температуре  $20^\circ\text{C}$ . Газу сообщается  $4600 \text{ кДж}$  теплоты. Определите температуру и давление диоксида углерода в конце процесса.

### Задача №3

В газгольдере объемом  $15 \text{ м}^3$  находится метан при давлении  $0,8 \text{ МПа}$  и температуре  $10^\circ\text{C}$ . Благодаря солнечной радиации температура газа в течение дня повысилась на  $\Delta t = 15\text{К}$ . Как возросло давление газа в газгольдере и какое количество теплоты воспринял газ? Теплоемкость метана считать не зависящей от температуры. Молекула метана не линейна.

### Задача №4

В закрытом сосуде, объемом  $6 \text{ м}^3$ , находится водород при давлении  $0,2 \text{ МПа}$  и температуре  $37^\circ\text{C}$ . Газ нагревается пока давление не становится равным  $0,9 \text{ МПа}$ . Определите параметры газа в конце процесса и количество подведенной теплоты.

### Задача №5

При адиабатном расширении  $1 \text{ кг}$  воздуха ( $k = 1,4$ ) температура его падает на  $120\text{К}$ . Какова полученная в процессе расширения работа и сколько теплоты следовало бы подвести к воздуху, чтобы ту же работу получить в изотермическом процессе?

### Задача №6

Какова начальная температура  $t_1$  азота, если его конечная температура после совершения процесса адиабатного сжатия  $t_2 = 750^\circ\text{C}$ . Известна степень сжатия  $\varepsilon = \nu_1/\nu_2 = 10$ . Теплоемкости  $c_p$  и  $c_v$  считать постоянными.

### Задача №7

В поршневом компрессоре сжимается воздух, имеющий давление 0,1МПа и температуру 20°С. Процесс сжатия – политропный, с показателем политропы  $n=1,3$ . Давление в конце сжатия 0,7МПа. Определите работу сжатия для 1кг воздуха и количество отнятой теплоты.

### Задача №8

Воздух протекает по трубе с небольшой скоростью, течение адиабатное, т.е. без подвода и отвода теплоты. Газ идеальный. Параметры воздуха на входе 1,2МПа, 350°С. На выходе давление равно 0,7МПа. Найдите температуру в конце процесса течения.

## Практическое занятие №7

### Тема: Второй закон термодинамики. Цикл Карно

#### Основные формулы

#### 1. Второй закон термодинамики

$$ds \geq \frac{dq}{T};$$

$$s_2 - s_1 \geq \int_1^2 \frac{dq}{T}.$$

Знаки равенства и неравенства для обратимых и необратимых процессов соответственно.

#### 2. Изменение энтропии для идеальных газов

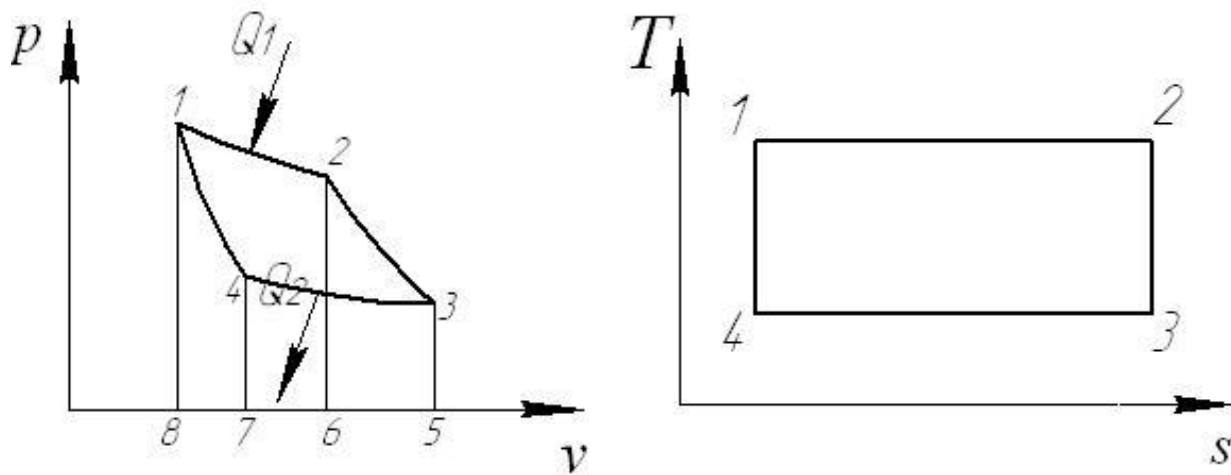
$$s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1};$$

$$s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1};$$

$$s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{v_2}{v_1} + c_v \ln \frac{p_2}{p_1}.$$

#### 3. Цикл Карно

Цикл Карно состоит из двух адиабат и двух изотерм.



Количество подведенной теплоты

$$q_1 = RT_1 \ln \frac{v_2}{v_1}.$$

Количество отведенной теплоты

$$q_2 = RT_2 \ln \frac{v_3}{v_4}$$

Работа цикла Карно

$$l_{\dot{o}} = q_1 - q_2.$$

Термический КПД

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

$$\eta_t = \frac{l_{\dot{o}}}{q_1},$$

$$\eta_t = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1},$$

где  $T_1$  и  $T_2$  – соответственно температуры верхнего и нижнего источника теплоты в К.

### Задача №1

Определите изменение энтропии 3 кг азота в политропном процессе при изменении температуры от  $t_1 = 100^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 300^\circ\text{C}$ . Показатель политропы  $n = 1,2$ . Теплоемкости принять по молекулярно-кинетической теории.

### Задача №2

Определить изменение энтропии водорода в изотермическом процессе при изменении давления от 1МПа до 3МПа. Теплоемкость принять по молекулярно-кинетической теории.

### Задача №3

Определить энтропию 1 кг кислорода при  $p=0,8\text{МПа}$  и  $t=250^{\circ}\text{C}$ . Теплоемкость считать постоянной.

### Задача №4

Найти энтропию 1 кг кислорода при  $p=0,8\text{МПа}$  и  $t=250^{\circ}\text{C}$ . Теплоемкость считать переменной, приняв зависимость ее от температуры линейной.

### Задача №5

1 кг воздуха сжимается по политропе от 0,1МПа и  $20^{\circ}\text{C}$  до 0,8 МПа при  $n=1,2$ . Определить конечную температуру, изменение энтропии, количество отведенной теплоты и затраченную работу.

### Задача №6

К газу в круговом процессе подведено 250 кДж теплоты. Термический КПД равен 0,46. найти работу, полученную за цикл.

### Задача №7

В результате осуществления кругового процесса получена работа, равная 80кДж, а отдано охладителю 50кДж теплоты. Определить термический КПД цикла.

### Задача №8

1 кг воздуха совершает цикл Карно в пределах температур  $t_1=627^{\circ}\text{C}$  и  $t_2=27^{\circ}\text{C}$ , причем наивысшее давление составляет 6 МПа, а низшее – 0,1 МПа. Определить параметры состояния воздуха в характерных точках цикла, работу, термический КПД цикла и количество подведенной и отведенной теплоты.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.А. Кудинов, Э.М. Карташов. Техническая термодинамика. Учебное пособие для Втузов, 2-е изд. перераб.: М.: Высшая школа, 2001. – 261 с.
2. Г.А. Мухачев, В.К. Щукин Термодинамика и теплопередача. Учебник для вузов.– 3-е изд., перераб.– М.: Высшая школа, 1991.– 480с.
3. В.А. Кириллин и др. Техническая термодинамика. Учебник для вузов. Изд. 2-е. М.: Энергия, 1974.–448 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |    |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ.....   | 3  |
| Практическое занятие №1 Параметры состояния. ....                   | 4  |
| Практическое занятие №2 Уравнение состояния идеальных газов.....    | 6  |
| Практическое занятие №3 Смеси идеальных газов.....                  | 8  |
| Практическое занятие №4 Теплоемкость газов.....                     | 11 |
| Практическое занятие № 5 Первый закон термодинамики.....            | 17 |
| Практическое занятие № 6 Основные термодинамические процессы.....   | 19 |
| Практическое занятие №7 Второй закон термодинамики. Цикл Карно..... | 22 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....                                       | 25 |

И.А. Мутугуллина, кандидат технических наук

**ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ  
ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКЕ**

по курсу

Техническая термодинамика и теплотехника  
(Кафедра Технологических машин и оборудования БФ «КНИТУ»)

Печатается в авторской редакции