

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Севастопольский государственный университет»

Морской институт  
Кафедра энергоустановок морских судов и сооружений

**В.А. Тимофеев, О.В. Владецкий**

## **ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА**

**Методические указания**  
к выполнению практических занятий по дисциплине  
(Часть 1 – техническая термодинамика)



Севастополь  
СевГУ  
2019

УДК 536.7  
ББК 39.46  
Т41

**Р е ц е н з е н т:**

**С.Е.Тверская** - канд. техн. наук, доцент кафедры ЭМСС

**Ответственный за выпуск:**

**К.Ю. Федоровский** - доктор технических наук,  
профессор, заведующий кафедрой ЭМСС

**Тимофеев В.А.**

**Т41**      Техническая термодинамика и теплопередача: метод. указания к выполнению практических занятий по дисциплине (Часть 1 – техническая термодинамика) / В.А. Тимофеев, О.В. Владецкий. – Севастополь: СевГУ, 2019. – 28 с.

Целью методических указаний является оказание помощи студентам в овладении навыков применения полученных теоретических знаний при решении практических инженерных задач. Требования и рекомендации, изложенные в Методических указаниях, направлены на углубление знаний и умений, предусмотренных требованиями Международной Конвенции ПДМНВ 78/95 с поправками 1995 г. (Раздел А-III/2).

УДК 536.7  
ББК 39.46

Методические указания рассмотрены и утверждены на заседании кафедры ЭМСС, протокол № 1 от 31 августа 2018 года.

Допущено к изданию ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» в качестве методических указаний для студентов направления подготовки 26.05.06 «Эксплуатация судовых энергетических установок» очной и заочной форм обучения.

© Тимофеев В.А., Владецкий О.В., 2019  
© ФГАОУВО «Севастопольский  
государственный университет», 2019

## СОДЕРЖАНИЕ

|    |                                                                                                 |    |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. | Практическое занятие № 1. Идеальные газы, параметры состояния, основные закономерности.....     | 4  |
| 2. | Практическое занятие № 2. Газовые смеси, теплоемкость газов и их смеси.....                     | 6  |
| 3. | Практическое занятие № 3. Первый и второй законы термодинамики.....                             | 9  |
| 4. | Практическое занятие № 4. Основные газовые процессы идеального газа.....                        | 10 |
| 5. | Практическое занятие № 5. Водяной пар и влажный воздух...                                       | 12 |
| 6. | Практическое занятие № 6. Истечение газов и паров. Дросселирование.....                         | 14 |
| 7. | Практическое занятие № 7. Расчет теоретических циклов двигателей внутреннего сгорания.....      | 17 |
| 8. | Практическое занятие № 8. Расчет паросиловых и холодильных установок.....                       | 20 |
|    | Библиографический список .....                                                                  | 25 |
|    | Приложение А. Молекулярные массы, плотности, объемы ...                                         | 26 |
|    | Приложение Б. Интерполяционные формулы для средних массовых и объемных теплоемкостей газов..... | 27 |

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 1 ИДЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ, ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ, ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ

**Цель занятия:** получить практические навыки расчета термодинамических параметров состояния.

**Содержание занятия:** усвоить физический смысл параметров состояния, изучить связь между ними, расчет по уравнению состояния идеального газа; выполнить расчет согласно задания, оформить отчет.

Величины, характеризующие тело в данном состоянии, называются *параметрами* состояния. Чаще всего состояние тела определяется следующими параметрами: *удельным объемом* ( $v$ ), *абсолютным давлением* ( $p$ ) и *абсолютной температурой* ( $T$ ).

1. **У д е л ь н ы й о б ъ е м** ( $v$ ) тела представляет собой объем единицы его массы. Это величина, обратная плотности тела ( $\rho$ ).

Если  $V$  — объем в  $\text{м}^3$  занимаемый телом массой  $M$  кг, то удельный объем

$$v = \frac{V}{M}, \left[ \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \right] \quad (1)$$

Очевидно, что

$$v \cdot \rho = 1 \quad (2)$$

2. **А б с о л ю т н о е д а в л е н и е**  $p$  измеряют силой, приходящейся на единицу поверхности. Так как за единицу силы принимают 1 ньютона, а за единицу поверхности – квадратный метр, то давление измеряют в ньютонах на квадратный метр ( $\text{Н/м}^2$  или  $\text{Па}$ ). Во всех термодинамических уравнениях пользуются этой единицей, и поэтому в применяемые формулы следует подставлять числовое значение давления в  $\text{Н/м}^2$  [1].

Для практических целей удобнее измерять давление в  $\text{кН/м}^2$  (килоньютон на квадратный метр или  $\text{кПа}$ ),  $\text{МН/м}^2$  (меганьютон на квадратный метр или  $\text{МПа}$ ). Часто давление измеряется в барах. Эта единица в  $10^5$  раз больше  $1 \text{ Н/м}^2$ .

Соотношения между используемыми в технике единицами измерения давления даны в таблице 1.

Абсолютное давление может быть определено по формуле:

$$p = p_{\text{ман}} + B,$$

где  $B$  – атмосферное или барометрическое давление, а  $p_{\text{ман}}$  – избыточное давление, замеренное манометром.

Если абсолютное давление  $p$  меньше барометрического давления  $B$ , то возникает вакуум или разряжение. Величину вакуумного давления  $p_{\text{вак}}$  можно определить по формуле

$$p_{\text{вак}} = p - B$$

Таблица 1 – Соотношения между единицами давления

| Единицы                                | Ньютон на квадратный метр, $H/m^2$ | Бар ( $10^5 H/m^2$ ) | Техническая атмосфера, $at$ | Физическая атмосфера, $атм$ |
|----------------------------------------|------------------------------------|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| $1 \text{ кг/см}^2$ ( $1 \text{ ат}$ ) | 98066,5                            | 0,980665             | 1                           | 0,96784                     |
| $1 \text{ атм}$ (физ.)                 | 101325                             | 1,01325              | 1,03323                     | 1                           |
| $10^4 \text{ мм вод. ст.}$             | 98066,5                            | 0,980665             | 1                           | 0,96784                     |
| $10^3 \text{ мм рт. ст.}$              | 133322                             | 1,33322              | 1,35951                     | 1,31579                     |
| $10 \text{ lbf/in}^2$                  | 68948                              | 0,68948              | 0,70307                     | 0,68046                     |

Продолжение таблицы 1

| Единицы                                | Миллиметр водяного столба $\text{мм вод. ст.}$ | Миллиметр ртутного столба $\text{мм рт. ст.}$ | Английский фунт-сила на квадратный дюйм |
|----------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------|
| $1 \text{ кг/см}^2$ ( $1 \text{ ат}$ ) | $10^4$                                         | 785,56                                        | 14,223                                  |
| $1 \text{ атм}$ (физ.)                 | 10332                                          | 760                                           | 14,696                                  |
| $10^4 \text{ мм вод. ст.}$             | $10^4$                                         | 735,56                                        | 14,223                                  |
| $10^3 \text{ мм рт. ст.}$              | $1,35951 \cdot 10^4$                           | $10^3$                                        | 19,336                                  |
| $10 \text{ lbf/in}^2$                  | 7030                                           | 517,149                                       | 10,000                                  |

3. Третьей основной величиной, характеризующей состояние тела, является *абсолютная температура* ( $T$ ). Она измеряется в градусах Кельвина ( $K$ ), кроме того в быту и технике широко используется температура ( $t$ ), определяемая по шкале Цельсия. Связь между этими температурами вытекает из зависимости

$$T(K) = t(^{\circ}C) + 273,15$$

В США и Англии для измерения температуры применяют шкалу Фаренгейта. Для перевода показаний этой шкалы в градусы Цельсия служат соотношения

$$t(^{\circ}C) = \frac{5}{9}[t(^{\circ}F) - 32]$$

$$t(^{\circ}F) = \frac{9}{5}t(^{\circ}C) + 32$$

Под *идеальным газом* понимают воображаемый газ, в котором отсутствуют силы притяжения между молекулами, а собственный объем молекул исчезающе мал по сравнению с объемом междумолекулярного пространства. Таким образом, молекулы идеального газа принимаются за материальные точки. Все существующие газы при высоких температурах и малых давлениях по своим свойствам приближаются к свойствам идеального газа. Поэтому такие газы можно также считать идеальными. Если же притяжением молекул и их объемом пренебречь нельзя, то такой газ называют реальным (пар). Все идеальные газы подчиняются законам Бойля-Мариотта и Гей-Люссака [2]

$$pv = \text{const} (T = \text{const});$$

$$\frac{v}{T} = \text{const} (p = \text{const})$$

Уравнения состояния идеального газа связывают между собой основные параметры состояния  $p$ ,  $v$  и  $t$  и могут быть представлены зависимостями

$$pV = MRT$$

$$pv = RT$$

$$pV_m = m \cdot R \cdot T,$$

где  $M$  – масса газа в кг,  $R$  — газовая постоянная исследуемого газа (Дж/кгК),  $V_m$  – объем одного киломоля газа,  $mR = 8,314$  кДж/кмольК – универсальная газовая постоянная

Для усвоения материала используются следующие задания ([4] № 1, 2, 3, 5, 6, 8, 10, 11, 12, 13, 16-23, 25-30, 32-43, 46, 47, 48, 50, 51, 53-58, 60, 62-66, 68-76).

Отчетность по результатам данного занятия проводится письменно в соответствии с заданием или в устной форме в виде опроса.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 2

### ГАЗОВЫЕ СМЕСИ, ТЕПЛОЕМКОСТЬ ГАЗОВ И ИХ СМЕСИ

**Цель занятия:** получить практические навыки расчета параметров газовых смесей.

**Содержание занятия:** ознакомиться с зависимостями между параметрами газовой смеси; выполнить расчет параметров газовой смеси согласно задания, оформить отчет.

Чистые газы, входящие в состав газовой смеси, называют компонентами. Давление отдельного компонента смеси на стенку сосуда, в котором помещена смесь, называют парциальным. Согласно закону Дальтона абсолютное давление смеси идеальных газов равно сумме парциальных давлений компонентов [1].

Состав газовой смеси может быть задан массовыми ( $g_i$ ), объемными ( $r_i$ ) или мольными ( $r_i$ ) долями:

$$g_i = \frac{m_i}{m_{см}}, \quad r_i = \frac{V_i}{V_{см}}, \quad r_i = \frac{x_i}{x_{см}},$$

где  $m_{см}$ ,  $V_{см}$  и  $x_{см}$  – масса, объем и число молей смеси соответственно;  $m_i$ ,  $V_i$  и  $x_i$  – масса, приведенный к давлению смеси ( $T = \text{const}$ ) объем и число молей  $i$ -го компонента соответственно.

Причем  $\sum_{i=1}^n g_i = 1$  и  $\sum_{i=1}^n r_i = 1$ .

Доли могут быть переведены одна в другую, например, по формулам

$$g_i = \frac{r_i \mu_i}{\sum_{i=1}^n r_i \mu_i}, \quad r_i = \frac{\frac{g_i}{\mu_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\mu_i}}$$

где  $\mu_i$  – молекулярная масса  $i$ -го компонента.

Количество теплоты  $q_x$ , которое нужно подвести к единице количества газа  $N$ , чтобы изменить его температуру на 1 К в каком-либо термодинамическом процессе называют средней удельной теплоемкостью газа в этом процессе.

$$C_{xm} \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{q_x}{N \cdot \Delta t},$$

где  $q_x$  – количество подведенной теплоты, кДж;  $\Delta t = t_2 - t_1$  – соответствующее изменение температуры газа, К;  $N$  – количество вещества.

Каждый процесс имеет свою собственную теплоемкость для одного и того же газа.

Предел, к которому стремится средняя теплоемкость при  $\Delta t \rightarrow 0$  называют истинной теплоемкостью газа в данном процессе  $x$ .

$$C_x = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} C_{xm} \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{dq_x}{dt}$$

В зависимости от выбранной единицы количества вещества различают теплоемкости:

- 1) массовую, отнесенную к одному килограмму газа,  $C_x, C_{xm} \left[ \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right]$
- 2) объемную, отнесенную к  $1 \text{ м}^3$  при нормальных условиях  $C'_x, C'_{xm} \left[ \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}} \right]$ .
- 3) мольную, отнесенную к одному молю газа,  $mC_x, mC_{xm} \left[ \frac{\text{кДж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \right]$ .

Связь между этими теплоемкостями такова:

$$C_x = \frac{mC_x}{m} = C'_x \cdot v$$

Для идеальных газов связь между теплоемкостью, определенной в изобарном процессе  $C_p$ , и теплоемкостью, определенной в изохорном процессе  $C_v$ , устанавливается уравнением Майера

$$C_p - C_v = R \text{ или } m \cdot C_p - m \cdot C_v = m \cdot R = 8,314 \left[ \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}} \right]$$

где  $R$  – газовая постоянная исследуемого газа, а  $mR$  – универсальная газовая постоянная.

Теплоемкость смеси газов можно определить по следующим формулам:

- 1) для смеси, заданной массовыми долями:

$$C_{смх} = \sum_{i=1}^n g_i \cdot C_{xi}$$

- 2) для смеси, заданной объемными долями:

$$C'_{смх} = \sum_{i=1}^n r_i \cdot C'_{xi}$$

- 3) для смеси, заданной мольными долями:

$$mC_{смх} = \sum_{i=1}^n r_i \cdot mC_{xi}$$

Для усвоения материала используются следующие задания ([4] № 78, 80-92, 94, 96, 97, 101, 103-105, 108, 110, 113, 114, 116, 117, 118, 120-129, 131-137, 139-141, 143-149).

Отчетность по результатам данного занятия проводится письменно в соответствии с заданием или в устной форме в виде опроса.

### **ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 3 ПЕРВЫЙ И ВТОРОЙ ЗАКОНЫ ТЕРМОДИНАМИКИ**

**Цель занятия:** изучить формулировки первого и второго закона термодинамики и их практическое приложение.

**Содержание занятия:** проанализировать различные формулировки первого и второго закона термодинамики, выполнить индивидуальное задание, оформить отчет.

Первый закон термодинамики базируется на всеобщем законе сохранения энергии и утверждает, что полная энергия изолированной термодинамической системы при любых происходящих в ней процессах остается неизменной.

Применительно к проблемам технической термодинамики он звучит так: “изменение внутренней энергии рабочего тела в термодинамическом процессе равно разности между энергией, подведенной в форме теплоты, и энергией, подведенной в форме работы” [1].

Математическое выражение 1-го закона имеет две формы:

$$dq = du + pdv,$$

$$dq = dh - vdp.$$

Из них вытекает основное термодинамическое тождество:

$$Dq = Tds = du + pdv = dh - vdp.$$

Второй закон термодинамики имеет несколько формулировок, например:

Р. Клазиус – “теплота не может сама собой переходить от менее нагретого тела к более нагретому, или некомпенсированный переход теплоты от тела холодного к телу горячему невозможен”.

Р. Планк – “нельзя построить периодически действующий двигатель, единственным результатом действия которого было бы охлаждение источника теплоты и поднятие груза (производство работы). Часть подведенной теплоты необходимо отдать нижнему источнику”.

С. Карно – “для получения из теплоты работы необходимо иметь разность температур” и т.д.

Из 2-го закона термодинамики следует, что в двигателях, работающих по круговым циклам, не вся подведенная к рабочему телу теплота преобразуется в работу, поскольку для осуществления цикла необходимо часть подведенной теплоты отдавать в окружающую среду, поэтому к.п.д. любого теплового двигателя  $\eta_t$  меньше единицы.

$$\eta_t = \frac{l_0}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1} < 1,$$

где  $l_0$  – полезная работа,  $q_1$  – подведенная теплота,  $q_2$  – отведенная теплота.

Математическое выражение второго закона термодинамики для круговых процессов выглядит следующим образом:

$$\oint \frac{dq}{T} < 0 \quad \text{– необратимые циклы,}$$

$$\oint \frac{dq}{T} = 0 \quad \text{– обратимые циклы,}$$

а для разомкнутых процессов:

$$ds > \frac{dq}{T} \quad \text{– необратимые процессы,}$$

$$ds = \frac{dq}{T} \quad \text{– обратимые процессы.}$$

Для усвоения материала используются следующие задания ([4] № 118, 120-129, 131-137, 139-141, 143-149, 238, 241, 243, 245, 252, 253, 255, 256, 258).

Отчетность по результатам данного занятия проводится письменно в соответствии с заданием или в устной форме в виде опроса.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 4 ОСНОВНЫЕ ГАЗОВЫЕ ПРОЦЕССЫ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

**Цель занятия:** получить практические навыки расчета параметров идеального газа в его основных процессах.

**Содержание занятия:** ознакомиться с зависимостями между термодинамическими параметрами для основных процессов идеального газа, выполнить расчет параметров газа согласно задания, оформить отчет.

В термодинамике различают четыре простейших термодинамических процесса: изохорный ( $v = \text{const}$ ), изобарный ( $p = \text{const}$ ), изотермный ( $T = \text{const}$ ) и адиабатный ( $S = \text{const}$ ), а также обобщающий их политропный процесс, уравнение которого выглядит следующим образом:

$$p \cdot v^n = \text{const},$$

где  $n$  – показатель политропы.

Из этого уравнения при различных значениях  $n$  можно получить уравнения простейших процессов. Так при

$$n = 0, p \cdot v^n = \text{const} \rightarrow p = \text{const},$$

$$n = \pm \infty, p \cdot v^n = \text{const} \rightarrow v = \text{const},$$

$$n = 1, p \cdot v^n = \text{const} \rightarrow T = \text{const},$$

$$n = k, p \cdot v^n = \text{const} \rightarrow p \cdot v^n = \text{const} (S = \text{const}).$$

Во всех термодинамических процессах изменения калорических параметров состояния можно найти из универсальных формул

$$du = C_v dT,$$

$$dh = C_p dT,$$

$$ds = C_v \cdot \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v},$$

$$ds = C_p \cdot \frac{dT}{T} - R \frac{dp}{p}.$$

Кроме того, для политропного процесса выведены следующие зависимости

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

$$l_n = \frac{1}{n-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2) = \frac{R}{n-1} (T_1 - T_2) = \frac{RT_1}{n-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right],$$

$$q_n = \Delta u + l_n = C_{vm} (T_2 - T_1) + \frac{R}{n-1} (T_1 - T_2).$$

Из этих зависимостей можно легко получить зависимости, характеризующие простейшие процессы путем замены  $n$  на соответствующее числовое значение [4].

Помимо этого, теплота политропного процесса  $q_n$  и изменение энтропии в нем  $\Delta s$  могут быть найдены с помощью политропной теплоемкости  $C_n$

$$dq_n = C_n dT, \quad ds = C_n \frac{dT}{T}.$$

где  $C_n = C_v \left( \frac{n-k}{n-1} \right)$ ,  $k = \frac{c_p}{c_v}$ ,  $n = \lg \left( \frac{p_2}{p_1} \right) / \lg \left( \frac{v_2}{v_1} \right)$ .

Для усвоения материала используются следующие задания ([4] № 150, 151, 153-155, 157, 159-161, 163, 165, 166, 168-172, 174-178, 180-185, 187-192, 194, 196-200, 202, 204, 206, 207, 209-211, 213, 215, 216, 219, 222, 223, 225-227, 229-233, 235, 236).

Отчетность по результатам данного занятия проводится письменно в соответствии с заданием или в устной форме в виде опроса.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 5 ВОДЯНОЙ ПАР И ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ

**Цель занятия:** получить практические навыки расчета параметров влажного воздуха и использования  $i-d$  диаграммы влажного воздуха.

**Содержание занятия:** ознакомиться с зависимостями для расчета параметров влажного воздуха, выполнить расчет и анализ процессов во влажном воздухе по  $i-d$  диаграмме согласно задания, оформить отчет.

Различают три вида водяного пара: влажный насыщенный, сухой насыщенный и перегретый.

Влажный насыщенный пар представляет собой механическую смесь капель жидкости и сухого пара, температура которой равна температуре воды при заданном давлении.

Сухой насыщенный пар имеет аналогичные параметры  $p$  и  $t$ , но не содержит капель жидкости.

У перегретого пара температура превышает температуру кипения при заданном давлении.

При анализе насыщенного пара широко используется понятие степени сухости  $x$

$$x = \frac{m_{c.n.}}{m_{c.n.} + m_{ж}} = 0 \dots 1,$$

где  $m_{c.n.}$  – масса сухого пара,  $m_{ж}$  – масса капель жидкости.

По степени сухости можно определить следующие параметры насыщенного пара:

$$v_x = xv'' + (1 - x)v',$$

где  $v''$  – удельный объем сухого насыщенного пара (табличная величина),  $v'$  – удельный объем кипящей жидкости (табличная величина).

$$h_x = h' + r x ,$$

$$s_x = s' + \frac{rx}{T} ,$$

где  $h'$  и  $s'$  – соответственно удельные энтальпия и энтропия кипящей жидкости (табличная величина),  $r$  – удельная теплота парообразования (табличная величина).

Изменение калорических параметров состояния в паровых процессах определить по формулам

$$\Delta u = q_p + p \Delta v ,$$

$$\Delta h = q_p = h_2 - h_1 ,$$

$$\Delta s' = s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{dq_p}{T} = \int_1^2 C_p \frac{dT}{T} = C_{pm} \ln \frac{T_2}{T_1} .$$

Для анализа паровых процессов широко используется  $h - s$  диаграмма водяного пара (см. Приложение).

Смесь сухого воздуха с водяным паром называют влажным воздухом. Если пар в этой смеси находится в насыщенном состоянии, воздух также называют насыщенным, а если пар находится в перегретом состоянии – не-насыщенным [1].

Для анализа влажного воздуха используют следующие параметры:

1) абсолютная влажность  $\rho_n$  – количество водяного пара, приходящегося на 1 м<sup>3</sup> влажного воздуха:

$$\rho_n = m_n / V_{в.в} = m_n / V_n .$$

2) относительная влажность  $\varphi$  – отношение абсолютной влажности воздуха к максимально возможной абсолютной влажности при температуре воздуха:

$$j = \frac{r_n}{r_{н.п.}} = \frac{p_n}{p_{н.п.}} ,$$

где  $\rho_n$ ,  $p_n$  – соответственно плотность и парциальное давление пара в воздухе;  $\rho_{н.п.}$ ,  $p_{н.п.}$  – соответственно плотность и парциальное давление насыщенного пара при температуре воздуха.

3) влагосодержание  $d$  – количество водяного пара, приходящееся на 1 кг сухого воздуха:

$$d = \frac{m_n}{m_{с.в}} = 0,622 \frac{\varphi p_n}{B - \varphi p_n} ,$$

где  $B$  – атмосферное давление.

Причем плотность влажного воздуха  $\rho_{\text{вв}}$  находят как сумму плотностей пара и сухого воздуха при их парциальных давлениях

$$\rho_{\text{вв}} = \rho_{\text{св}} + \rho_n = \rho_{\text{св}}(1+d).$$

А энтальпия влажного воздуха  $h_{\text{вв}}$  равна

$$h_{\text{вв}} = h_{\text{св}} + h_n \cdot d = C_{p_{\text{св}}} \cdot t + h_n \cdot d \approx t + (2500 + 1,9t)d.$$

Для анализа состояний влажного воздуха широко используется  $H$ - $d$  диаграмма (см. Приложение).

Для усвоения материала используются следующие задания ([4] 311-314, 318, 321-326, 332-335, 338-344, 346-350, 352-356, 358-360, 363, 365, 367, 368, 371, 376-378, 380-388, 466, 470-472, 475, 477, 478, 481).

Отчетность по результатам данного занятия проводится письменно в соответствии с заданием или в устной форме в виде опроса.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 6 ИСТЕЧЕНИЕ ГАЗОВ И ПАРОВ. ДРОССЕЛИРОВАНИЕ

**Цель занятия:** получить практические навыки расчета скорости истечения и расхода газа через сопло, расчета параметров газа при дросселировании.

**Содержание занятия:** ознакомиться с расчетными зависимостями, выполнить расчет параметров газа в соответствии с индивидуальным заданием, оформить отчет.

При решении задач, связанных с истечением газа через сопла, чаще всего приходится определять скорость истечения и расход газа. Решение начинают с нахождения перепада давления через сопло  $\beta$

$$\beta = \frac{p_2}{p_1},$$

где  $p_1$  – давление газа во входном сечении сопла,  $p_2$  – давление газа в выходном сечении.

Затем сравнивают полученное значение  $\beta$  с  $\beta_{\text{кр}}$ , характерное для данного газа:

$$\beta_{\text{кр}} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}},$$

где  $k$  – показатель адиабаты.

Если адиабатное истечение газа происходит при  $\beta = \beta_{кр}$ , то теоретическая скорость истечения определяется по формуле

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{2k}{k-1} p_1 v_1 \left(1 - \beta^{\frac{k-1}{k}}\right)},$$

где  $p_1$  и  $v_1$  – соответственно давление газа и его удельный объем во входном сечении сопла.

При истечении пара теоретическую скорость удобнее определять по формуле

$$\omega_2 = \sqrt{2(h_1 - h_2)},$$

где  $h_1$  и  $h_2$  – соответственно энтальпии пара в начальном и конечном состоянии в  $\left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}\right]$ .

Секундный расход газа через выходное сечение площадью  $f_2$  будет равен

$$G = f_2 \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{p_1}{v_1} \left(\beta^{\frac{2}{k}} - \beta^{\frac{k+1}{k}}\right)}.$$

Если же адиабатное истечение газа происходит при  $\beta \leq \beta_{кр}$ , то теоретическая скорость в выходном сечении суживающегося сопла будет равна критической скорости (местной скорости звука)

$$\omega_{кр} = a_{зв} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} p_1 v_1}.$$

Расход газа в этом случае будет максимальным и может быть вычислен по формуле

$$G_{max} = f_2 \sqrt{\frac{2k}{k+1} \frac{p_1}{v_1} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{2}{k-1}}}.$$

Для получения скоростей истечения выше критических (сверхзвуковые скорости) применяются либо расширяющиеся сопла, либо сопла Лавалю, содержащие как суживающуюся, так и расширяющуюся части. Перепад давления  $\beta$  при этом должен быть меньше критического значения.

Действительный процесс истечения всегда сопровождается трением между газом и внутренней поверхностью сопла, а также завихрением и трением в самом потоке. Наличие трения требует затраты части энергии

потока на его преодоление, поэтому действительная скорость истечения  $\omega_{2д}$  будет всегда меньше теоретической  $\omega_2$

$$\omega_{2д} = \varphi \cdot \omega_2,$$

где  $\varphi$  – скоростной коэффициент, составляющий, как правило, 0,95...0,98.

Потеря энергии на трение, которая превращается в теплоту и повышает энтальпию газа на выходе из сопла, равна  $\Delta h_c$

$$\Delta h_c = \frac{\omega_2^2}{2} - \frac{\omega_{2д}^2}{2} = (1 - \varphi^2) \frac{\omega_2^2}{2}.$$

Прохождение газом местного сопротивления без совершения внешней работы и с понижением его давления называют дросселированием.

При дросселировании любых газообразных рабочих тел их энтальпия не изменяется. В то время как температура остается постоянной только при дросселировании идеальных газов. При дросселировании реальных газов она остается неизменной только для состояний газа, соответствующих инверсионной кривой.

Из молекулярно-кинетической теории одну из температур инверсии можно определить по формулам

$$T_{инв} = \frac{2a}{bR}, \quad T_{инв} = 6,75 \cdot T_{кр},$$

где  $a$  и  $b$  – постоянные из уравнения Ван-дер-Ваальса;  $R$  – газовая постоянная;  $T_{кр}$  – критическая температура газа.

Для усвоения материала используются следующие задания ([4] 391-394, 396, 397, 401-403, 405-407, 410, 411, 413-420).

Отчетность по результатам данного занятия проводится письменно в соответствии с заданием или в устной форме в виде опроса.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 7 РАСЧЕТ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ (ДВС)

**Цель занятия:** получить практические навыки расчета параметров теоретических циклов ДВС.

**Содержание занятия:** ознакомиться с характеристиками цикла, расчетными зависимостями, выполнить расчет теплоты, работы и КПД цикла в соответствии с индивидуальным заданием, оформить отчет.

Различают три теоретических цикла ДВС:

- 1) цикл с подводом теплоты при  $v = \text{const}$ ;
- 2) цикл с подводом теплоты при  $p = \text{const}$ ;
- 3) цикл со смешанным подводом теплоты ( $v = \text{const}$ , затем  $p = \text{const}$ ).

Цикл с подводом теплоты при  $v = \text{const}$  изображен на рисунке 1 и является прототипом рабочего процесса в двигателях с принудительным зажиганием (карбюраторные ДВС).

Характеристиками цикла являются:

степень сжатия

$$\epsilon = v_1 / v_2 ;$$

степень повышения давления

$$l = p_3 / p_2 .$$

Количество подведенного тепла  $q_1$

$$q_1 = C_{vm}(T_3 - T_2).$$

Количество отведенного тепла  $q_2$

$$q_2 = C_{vm}(T_4 - T_1),$$

где  $T_1, T_2, T_3, T_4$  – температура узловых точек цикла;  $C_{vm}$  – средняя изохорная теплоемкость рабочего тела.

Работа цикла  $l_0$

$$l_0 = q_1 - q_2 .$$

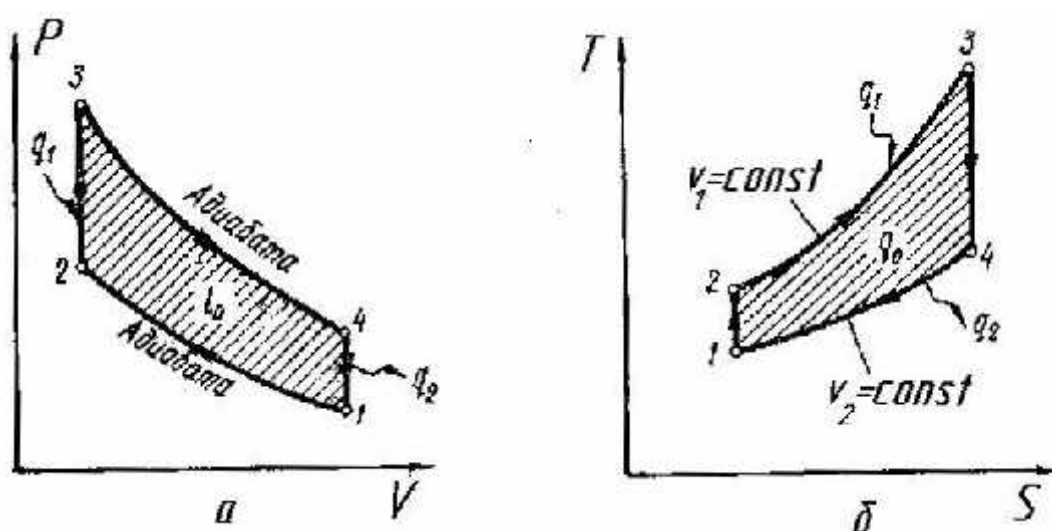


Рисунок 1 – Цикл ДВС с изохорным подводом теплоты:  
а – в  $P$ - $V$  координатах; б – в  $T$ - $S$  координатах

Термический КПД цикла  $\eta_t$

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{e^{k-1}}.$$

Цикл с подводом тепла при  $p = \text{const}$ , изображенный на рисунке 2, является прототипом рабочего процесса двигателей тяжелого топлива (компрессионных дизелей).

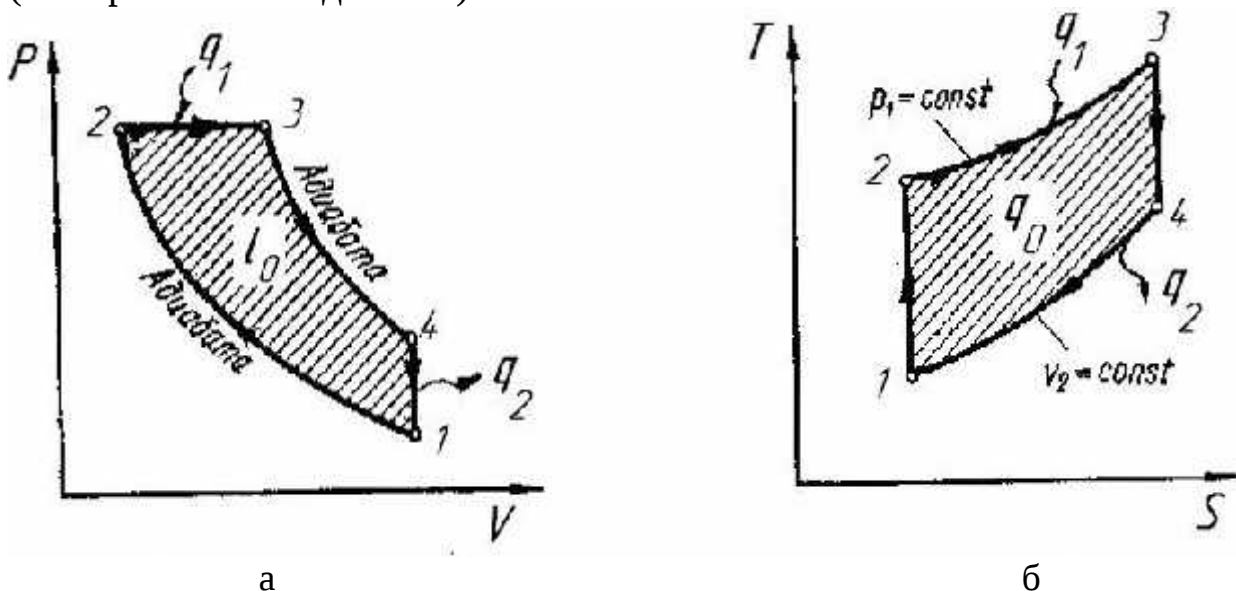


Рисунок 2 – Цикл ДВС с изобарным подводом теплоты:  
а – в  $P$ - $V$  координатах; б – в  $T$ - $S$  координатах

Характеристиками цикла являются:

– степень сжатия  $e = v_1/v_2$ ;

– степень предварительного расширения  $r = v_3/v_2$ .

Количество подведенного тепла  $q_1$

$$q_1 = C_{pm}(T_3 - T_2),$$

где  $C_{pm}$  – средняя изобарная теплоемкость рабочего тела.

Количество отведенного тепла  $q_2$

$$q_2 = C_{vm}(T_4 - T_1).$$

Работа цикла  $l_0$

$$l_0 = q_1 - q_2.$$

Термический КПД цикла  $\eta_t$

$$h_t = 1 - \frac{r^k - 1}{k(r - 1)} \cdot \frac{1}{e^{k-1}}.$$

Цикл со смешанным подводом теплоты, изображенный на рисунке 3, является прототипом рабочего процесса бескомпрессорных двигателей тяжелого топлива (дизелей с механическим распылом топлива).

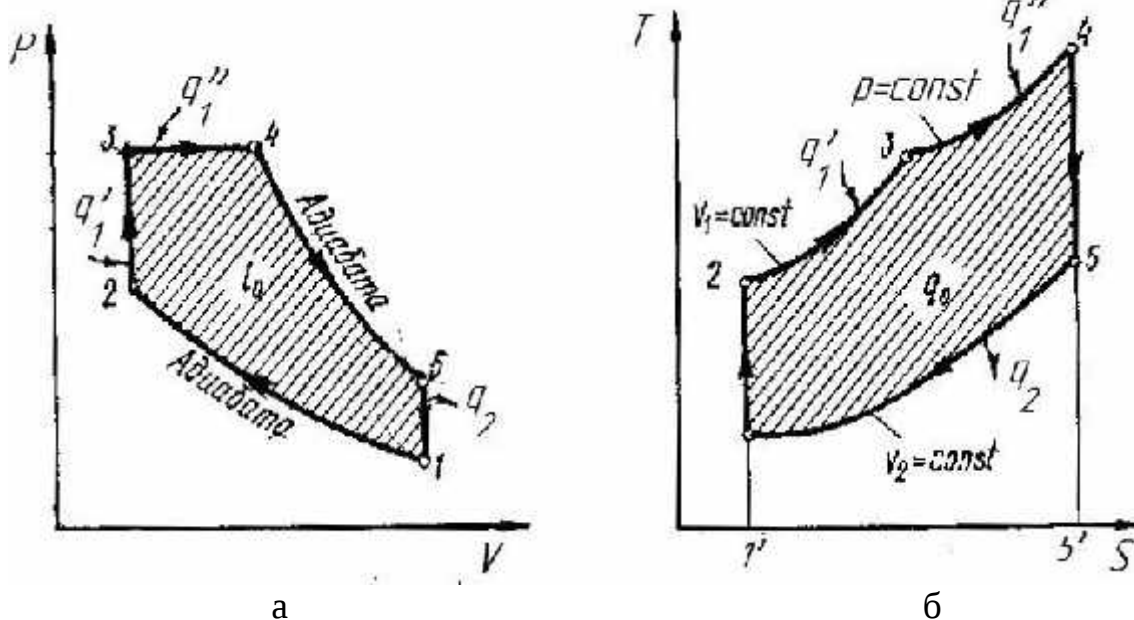


Рисунок 3 – Цикл ДВС со смешанным подводом теплоты:  
а – в P-V координатах; б – в T-S координатах

Характеристиками цикла являются

$$e = \frac{v_1}{v_2}; \quad l = \frac{p_3}{p_2}; \quad r = \frac{v_4}{v_3}.$$

Количество подведенного тепла  $q_1$

$$q_1 = q_1^v + q_1^p = C_{vm}(T_3 - T_2) + C_{pm}(T_4 - T_3).$$

Количество отведенного тепла  $q_2$

$$q_2 = C_{vm}(T_5 - T_1).$$

Работа цикла  $l_0$

$$l_0 = q_1 - q_2.$$

Термический КПД цикла  $\eta_t$

$$h_t = 1 - \frac{l \cdot r^k - 1}{l - 1 + k l (r - 1)} \cdot \frac{1}{e^{k-1}}.$$

Во всех приведенных выше теоретических циклах формулы для вычисления теплоты и КПД получены в предположении, что при осуществлении циклов и изохорная, и изобарная теплоемкости не изменяются.

Для усвоения материала используются следующие задания ([4] № 259-261, 262, 263, 265-267, 269, 270, 272-274, 280-282, 283-289).

Отчетность по результатам данного занятия проводится письменно в соответствии с заданием или в устной форме в виде опроса.

### ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 8 РАСЧЕТ ПАРОСИЛОВЫХ И ХОЛОДИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

**Цель занятия:** получить практические навыки расчета параметров цикла паросиловых и холодильных установок.

**Содержание занятия:** ознакомиться с характеристиками цикла, расчетными зависимостями, выполнить расчет параметров цикла в соответствии с индивидуальным заданием, оформить отчет.

Основным циклом паросиловых установок является цикл Ренкина. Этот цикл в диаграмме  $T-S$  показан на рисунке 4.

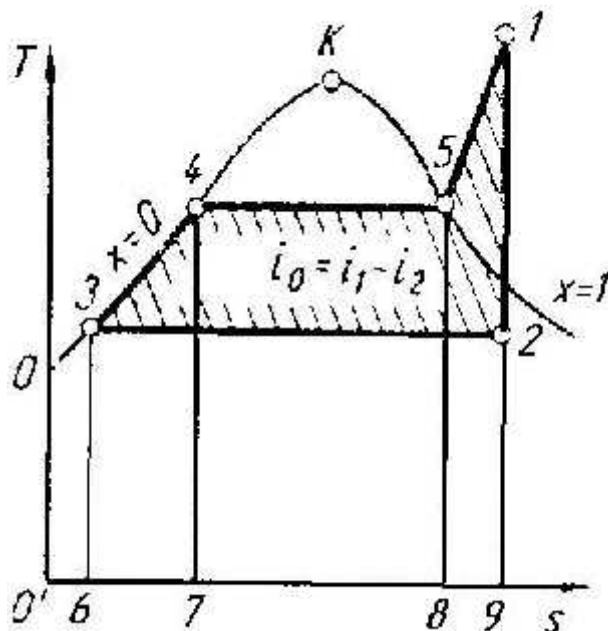


Рисунок 4 – Цикл Ренкина

Кривая 3-4 изображает нагревание воды в экономайзере парового котла. Точка 4 соответствует температуре кипящей воды при давлении  $p_1$

в котле. Площадь, лежащая под кривой 3-4, определяет количество подведенного тепла  $q_{ж}$ . Прямая 4-5 изображает процесс парообразования, а площадь прямоугольника 4-5-8-7-4 соответствует теплоте парообразования  $r$ . Кривая 5-1 изображает процесс перегрева пара, протекающий в пароперегревателе. А площадь под этой кривой соответствует подведенной в этом процессе теплоте  $q_{пе}$ . Совокупность обозначенных теплот равна теплоте  $q_1$ , подведенной к рабочему телу в цикле Ренкина.

$$q_1 = q_{ж} + r + q_{пе} = h_1 - h'_2 ,$$

где  $h_1$  – энтальпия пара, поступающего в турбину;  $h'_2$  – энтальпия поступающей в экономайзер жидкости.

Прямая 1-2 изображает адиабатное расширение пара в турбине, при этом энтальпия уменьшается от  $h_1$  до  $h_2$  за счет отбора полезной работы  $l_0$

$$l_0 = h_1 - h_2 ,$$

где  $h_2$  – энтальпия пара, выходящего из турбины.

Прямая 2-3 соответствует теплоте  $q_2$ , отводимой от пара при его конденсации

$$q_2 = h_2 - h'_2 .$$

Схема паросиловой установки, работающей по циклу Ренкина, представлена на рисунке 5.

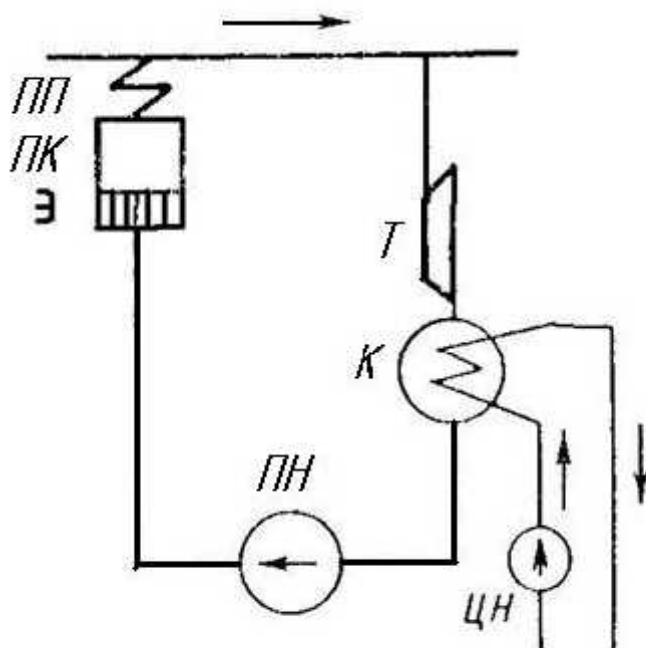


Рисунок 5 – Схема паросиловой установки, работающей по циклу Ренкина: Э – экономайзер; ПК – паровой котел; ПП – пароперегреватель; Т – турбина; К – конденсатор; ЦН – циркуляционный насос; ПН – питательный насос

Термический КПД цикла Ренкина равен

$$\eta_{\text{Ренк}} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_2'}.$$

Удельный расход пара  $d_0$  при этом составляет

$$d_0 = \frac{3600}{h_1 - h_2} \left[ \frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}} \right].$$

Наиболее совершенной холодильной установкой в настоящее время является парокомпрессионная. Схема такой установки представлена на рисунке 6. Она состоит из холодильной камеры 1, компрессора 2, конденсатора 3 и дросселя 4.

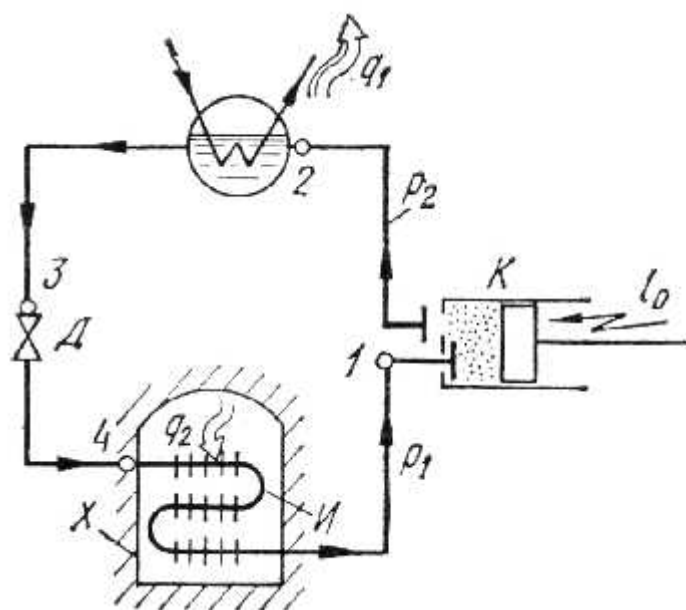


Рисунок 6 – Схема парокомпрессионной холодильной установки

На рисунке 7 изображен в  $T$ - $S$  диаграмме цикл парокомпрессионной установки. Линия 1-2 обозначает процесс адиабатного сжатия паров хладагента в компрессоре 2, а линия 2-3 охлаждение и конденсацию паров хладагента в конденсаторе 3 до жидкого состояния.

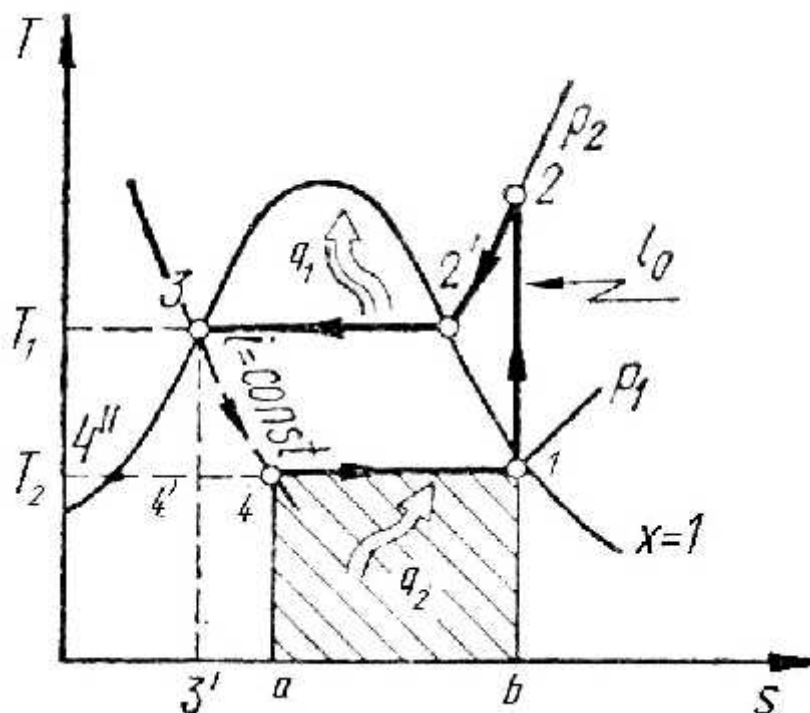


Рисунок 7 – Цикл парокомпрессионной установки

Линия 3-4 обозначает процесс дросселирования хладагента в дросселе 4, при этом хладагент переходит состояние влажного насыщенного пара и подается в теплообменник холодильной камеры 1, где он, испаряясь до состояния сухого насыщенного пара (линия 4-1), отбирает из каме-

ры 1 теплоту  $q_2$ , затем полученный пар засасывается компрессором 2, и цикл повторяется.

Эффективность циклов холодильных установок характеризуется холодильным коэффициентом  $\varepsilon$

$$\varepsilon = \frac{q_2}{l_0} = \frac{q_2}{q_1 - q_2} = \frac{h_1 - h_3}{h_2 - h_1},$$

где  $h_1$ ,  $h_2$  и  $h_3$  – энтальпии хладагента в соответствующих точках цикла.

Удельная холодопроизводительность  $q_2$  численно равна площади прямоугольника под прямой 4-1 и может быть вычислена как разность энтальпий

$$q_2 = h_1 - h_4 = h_1 - h_3.$$

Теоретическая работа  $l_0$ , необходимая для адиабатного сжатия хладагента в компрессоре 2

$$l_0 = h_2 - h_1.$$

Теоретическая мощность  $N$ , необходимая для привода компрессора 2

$$N = l_0 \cdot m = \frac{q_2 \cdot m}{\varepsilon} = \frac{Q_2}{\varepsilon},$$

где  $m$  – секундный расход хладагента,  $Q_2$  – холодопроизводительность установки.

Для усвоения материала используются следующие задания ([4] № 422-425, 427, 429-434, 437-440, 443, 444, 446, 448, 452, 453, 455, 459-461, 463, 464).

Отчетность по результатам данного занятия проводится письменно в соответствии с заданием или в устной форме в виде опроса.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Недужий И.А. Техническая термодинамика и теплопередача / И.А. Недужий, А.Н. Алабовский. – Киев: Высшая школа, 1978. – 223 с.
2. Кудинов В.А. Техническая термодинамика: учеб. пособие для втузов / В.А. Кудинов, Э.М. Карташов. — М.: Высш. шк., 2001. – 261 с.
3. Луканин В.Н. Теплотехника: учеб. для вузов / В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер. – М.: Высш. шк., 2000. – 671 с.
4. Рабинович О.М. Сборник задач по технической термодинамике / О.М. Рабинович. – М.: Машиностроение, 1969. – 375 с.
5. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача / В.В. Нащокин. – М.: Высшая школа, 1980. – 273 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

### Молекулярные массы, плотности и объемы киломолей при нормальных условиях и газовые постоянные важнейших газов

| Вещество                      | Химическое обозначение        | Молекулярная масса $\mu$ , кг/кмоль | Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | Объем киломоля $\mu v$ , м <sup>3</sup> /кг | Газовая постоянная, Дж/(кг·град) |
|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------|
| 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 <sup>1</sup> | N <sub>2</sub>                | 28,16                               | (1,257)                              | (22,40)                                     | (295,3)                          |
| Гелий                         | He                            | 4,003                               | 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                                       | 4124,01                          |
| Оксид 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 <sup>2</sup>      | H <sub>2</sub> O              | 18,016                              | (0,804)                              | (22,40)                                     | (461)                            |

<sup>1</sup> Атмосферный азот – условный газ, состоящий из азота воздуха вместе с двуокисью углерода и редкими газами, содержащимися в воздухе.

<sup>2</sup> Приведение водяного пара к нормальному состоянию является условным.

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б**  
**Интерполяционные формулы для средних массовых и объемных**  
**теплоемкостей газов**

| Газ                               | Массовая теплоемкость,<br>кДж/(кг·град) | Объемная теплоемкость,<br>кДж/(м <sup>3</sup> ·град) | Массовая теплоемкость,<br>ккал/(кг·град) | Объемная теплоемкость,<br>ккал/(м <sup>3</sup> ·град) |
|-----------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| <i>В пределах от 0 до 1000 °C</i> |                                         |                                                      |                                          |                                                       |
| O <sub>2</sub>                    | $C_{pm} = 0,9127 + 0,00012724t$         | $C'_{pm} = 1,3046 + 0,00018183t$                     | $C_{pm} = 0,2180 + 0,00003039t$          | $C'_{pm} = 0,3116 + 0,00004343t$                      |
|                                   | $C_{vm} = 0,6527 + 0,00012724t$         | $C'_{vm} = 0,9337 + 0,00018183t$                     | $C_{vm} = 0,1559 + 0,00003039t$          | $C'_{vm} = 0,2230 + 0,00004343t$                      |
| N <sub>2</sub>                    | $C_{pm} = 1,0258 + 0,00008382t$         | $C'_{pm} = 1,2833 + 0,00010492t$                     | $C_{pm} = 0,2450 + 0,00002002t$          | $C'_{pm} = 0,3065 + 0,00002506t$                      |
|                                   | $C_{vm} = 0,7289 + 0,00008382t$         | $C'_{vm} = 0,9123 + 0,00010492t$                     | $C_{vm} = 0,1741 + 0,00002002t$          | $C'_{vm} = 0,2179 + 0,00002506t$                      |
| CO                                | $C_{pm} = 1,0304 + 0,00009575t$         | $C'_{pm} = 1,2833 + 0,00011966t$                     | $C_{pm} = 0,2461 + 0,00002287t$          | $C'_{pm} = 0,3077 + 0,00002858t$                      |
|                                   | $C_{vm} = 0,7335 + 0,00009575t$         | $C'_{vm} = 0,9173 + 0,00011966t$                     | $C_{vm} = 0,1752 + 0,00002287t$          | $C'_{vm} = 0,2191 + 0,00002858t$                      |
| Воздух                            | $C_{pm} = 0,9952 + 0,00009349t$         | $C'_{pm} = 1,2870 + 0,00012091t$                     | $C_{pm} = 0,2377 + 0,00002233t$          | $C'_{pm} = 0,3074 + 0,00002888t$                      |
|                                   | $C_{vm} = 0,7084 + 0,00009349t$         | $C'_{vm} = 0,9161 + 0,00012091t$                     | $C_{vm} = 0,1692 + 0,00002233t$          | $C'_{vm} = 0,2188 + 0,00002888t$                      |
| H <sub>2</sub> O                  | $C_{pm} = 1,8401 + 0,00029278t$         | $C'_{pm} = 1,4800 + 0,00023551t$                     | $C_{pm} = 0,4395 + 0,00006993t$          | $C'_{pm} = 0,3535 + 0,00005625t$                      |
|                                   | $C_{vm} = 1,3783 + 0,00029278t$         | $C'_{vm} = 1,1091 + 0,00023551t$                     | $C_{vm} = 0,3292 + 0,00006993t$          | $C'_{vm} = 0,2649 + 0,00005625t$                      |
| SO <sub>2</sub>                   | $C_{pm} = 0,6314 + 0,00015541t$         | $C'_{pm} = 1,8472 + 0,00004547t$                     | $C_{pm} = 0,1508 + 0,00003712t$          | $C'_{pm} = 0,4412 + 0,00001086t$                      |
|                                   | $C_{vm} = 0,5016 + 0,00015541t$         | $C'_{vm} = 1,4763 + 0,00004547t$                     | $C_{vm} = 0,1198 + 0,00003712t$          | $C'_{vm} = 0,3526 + 0,00001086t$                      |
| <i>В пределах от 0 до 1500 °C</i> |                                         |                                                      |                                          |                                                       |
| H <sub>2</sub>                    | $C_{pm} = 14,2494 + 0,00059574t$        | $C'_{pm} = 1,2803 + 0,00005355t$                     | $C_{pm} = 3,4034 + 0,00014229t$          | $C'_{pm} = 0,3058 + 0,00001279t$                      |
|                                   | $C_{vm} = 10,1214 + 0,00059574t$        | $C'_{vm} = 0,9094 + 0,00005355t$                     | $C_{vm} = 2,4181 + 0,00014229t$          | $C'_{vm} = 0,2172 + 0,00001279t$                      |
| CO <sub>2</sub>                   | $C_{pm} = 0,8725 + 0,00024053t$         | $C'_{pm} = 1,7250 + 0,00004756t$                     | $C_{pm} = 0,2084 + 0,00005745t$          | $C'_{pm} = 0,4120 + 0,00001136t$                      |
|                                   | $C_{vm} = 0,6837 + 0,00024053t$         | $C'_{vm} = 1,3540 + 0,00004756t$                     | $C_{vm} = 0,1633 + 0,00005745t$          | $C'_{vm} = 0,3234 + 0,00001136t$                      |

**Тимофеев В. А.  
Владецкий О.В.**

**ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА  
И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА**

*Методические указания  
к выполнению практических занятий по дисциплине*

Издается в авторской редакции

Изд. № 30/19. Объем 1,75 п.л.  
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»