

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**

**ГОУ ВПО «Сибирский государственный технологический университет»**

**Н.П.Толкачева  
В.Я.Толкачев  
Л.Д.Ахрямкина**

**ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА**

Утверждено редакционно-издательским советом  
СибГТУ в качестве сборника задач и заданий на расчетно-  
графические работы с примерами решений для студентов очной и заочной  
форм обучения специальностей 250401, 220301, 250403, 150405, 280101,  
240406, 240100, 240701, 240702, 240403, 240502, 240401, 240801, 260601

**Красноярск 2011**

УДК: 621.1

T382

Толкачева Н.П.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА: сборник задач и заданий на расчетно-графические работы с примерами решений для студентов очной и заочной форм обучения специальностей 250401, 220301, 250403, 150405, 280101, 240406, 240100, 240701, 240702, 240403, 240502, 240401, 240801, 260601/ Н.П.Толкачева, В.Я.Толкачев, Л.Д.Ахрямкина. – Красноярск: СибГТУ, 2010. – 89 с.

Рецензенты: проф. Ю.В.Видин (СФУ); доц . Н.А. Романова (научно-методический совет СибГТУ).

© Н.П.Толкачева  
В.Я.Толкачев  
Л.Д.Ахрямкина

©ГОУ ВПО «Сибирский государственный  
технологический университет», 2011

---

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Основные параметры состояния	5
2. Идеальные газы и основные газовые законы	10
3. Теплоемкость газов	15
4. Первый закон термодинамики	17
5. Политропные процессы	22
6. Второй закон термодинамики	27
7. Расчет термодинамического газового цикла	31
8. Расчет работы теоретического поршневого компрессора	41
9. Водяной пар	43
10. Термодинамический расчет парового цикла	54
11. Библиографический список	62
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ</b>	
Приложение А (справочное)	63
Теплоемкость газов по С.Л.Ривкину	
Приложение Б (справочное)	67
Термодинамические свойства воды и водяного пара на линии насыщения (по давлению)	
Приложение В (справочное)	69
Термодинамические свойства воды и водяного пара на линии насыщения (по температурам)	
Приложение Г (справочное)	71
Физические свойства сухого воздуха	
Приложение Д (обязательное)	72
Пример расчета термодинамического газового цикла	
Приложение Е (обязательное)	80
Пример расчета цикла паросиловой установки	
Приложение Ж (обязательное)	88
h-s диаграмма водяного пара	
Перечень ключевых слов	89

## ВВЕДЕНИЕ

Данное пособие предназначено для самостоятельной работы студентов при изучении дисциплины «Теплотехника», которая является для всех специальностей Сибирского государственного технологического университета общепрофессиональной.

По программе учебного плана курса предусмотрены практические занятия, на которых студенты решают задачи, работают с диаграммами и выполняют самостоятельно расчётно-графические работы. Темы, на которые выдаются задания, зависят от специальности и времени, отводимого на изучение предмета в учебном стандарте, и предлагаются следующие:

1. Расчёт термодинамического газового цикла.
2. Расчёт работы поршневого компрессора.
3. Расчёт термодинамического парового цикла.

В пособии по каждой работе включены:

- а) исходные данные (100 вариантов);
- б) условия задания;
- в) перечень тем, которые необходимо проработать для выполнения задания;
- г) справочные материалы приведены в приложении для выполнения расчетов.

Выполнение заданий поможет студентам глубже освоить теоретический материал и его практическое применение.

Каждую работу рекомендуется начать с изучения теоретического материала по предлагаемому тематическому плану, используя библиографический список учебной литературы по дисциплине. Выполненная работа должна быть защищена. Защищая, студент обязан обратить внимание не только на правильность решения поставленной задачи, но и на глубину проработки теоретического материала, качество оформления работы по СТП 3.4.204 -01.

Все расчёты проводятся с использованием международной системы единиц - СИ.

## 1 ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ

Величины, характеризующие тело в данном состоянии, называются параметрами состояния. Состояние тела определяется следующими параметрами: удельным объемом, давлением и температурой.

1. Удельный объем (  $v$  ) представляет собой объем единицы массы. В технической термодинамике за единицу массы принимается килограмм (кг), за единицу объема - кубический метр ( $\text{м}^3$ ). Следовательно, удельный объем равен объему в кубических метрах одного килограмма вещества.

Если  $V$  - объем в  $\text{м}^3$ , занимаемая телом масса в  $G$  кг, то удельный объем

$$v = \frac{V}{G}, \quad \text{м}^3/\text{кг}. \quad (1.1)$$

Величина, обратная удельному объему, носит название плотности,

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{G}{V}, \quad \text{кг}/\text{м}^3. \quad (1.2)$$

Из уравнения (1.2) следует, что

$$v \cdot \rho = 1,$$

а также

$$V = G \cdot v = \frac{G}{\rho} \text{ м}^3, \quad G = \rho \cdot V = \frac{V}{v} \text{ кг}.$$

2. Давление (  $p$  ) измеряют силой, приходящейся на единицу площади. Так как в технической термодинамике за единицу площади принимают квадратный метр, то давление измеряется в ( $\text{Н}/\text{м}^2$ ). Во всех термодинамических уравнениях пользуются этой единицей, и поэтому в применяемые формулы следует подставлять числовое значение давления в  $\text{Н}/\text{м}^2$ . Для практического пользования эта единица очень мала, и ею пользуются только при измерении незначительных давлений. Чаще всего в практике давление измеряют в килограммах на квадратный сантиметр ( $\text{кг}/\text{см}^2$ ). Эта единица измерения носит название технической атмосферы или просто атмосферы (ат).

Давление можно также измерять высотой столба жидкости (обычно ртути или воды). Техническая атмосфера соответствует 735,6 мм рт. ст. при температуре ртути  $0^\circ\text{C}$  или 10 м вод.ст. Так называемая физическая атмосфера (атм) соответствует 760 мм рт.ст. при температуре ртути  $0^\circ\text{C}$  или 10,332 м вод.ст.

Таким образом,  $1 \text{ ат} = 1 \text{ кг/см}^2 = 10000 \text{ кг/м}^2 = 735,6 \text{ мм рт.ст.} = 10000 \text{ мм вод. ст.} = 98,03 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^2$ .

$1 \text{ атм.} = 1,0332 \text{ кг/см}^2 = 10332 \text{ кг/м}^2 = 760 \text{ мм рт.ст.} = 10332 \text{ мм вод.ст.} = 101325 \text{ Н/м}^2$ .

Манометры служат для измерения давления выше атмосферного. Их показания дают избыток давления измеряемой среды над атмосферным давлением - манометрическое, или избыточное давление.

Для получения истинного, или абсолютного, давления необходимо к манометрическому давлению прибавить барометрическое давление:

$$P_{\text{абс}} = P_{\text{ман}} + B, \quad (1.3)$$

где  $B$  - барометрическое давление (давление окружающей среды).

Если давление измерено в атмосферах, то применяют следующие обозначения: ата - для абсолютного давления и ати - для избыточного давления.

Вакуумметры служат для измерения давления ниже атмосферного. По их показаниям судят, насколько давление рассматриваемой среды меньше атмосферного (вакуум, разрежение). Абсолютное давление в этом случае определяется из равенства

$$P_{\text{абс}} = B - P_{\text{вак.}} \quad (1.4)$$

3. Третьей основной величиной, характерной для состояния тела, является температура. Она измеряется в технике градусами международной стоградусной шкалы ( $^{\circ}\text{C}$ ), у которой температура таяния льда и температура кипения воды при давлении 760 мм рт.ст. обозначены соответственно 0  $^{\circ}\text{C}$  и 100  $^{\circ}\text{C}$ .

В термодинамических исследованиях большие удобства представляет так называемая абсолютная шкала, у которой за начало отсчета температур принята температура абсолютного нуля. Абсолютный нуль ниже 0  $^{\circ}\text{C}$  на 273,16 $^{\circ}$ . На существование абсолютного нуля температурной шкалы впервые было указано великим русским ученым М.В.Ломоносовым еще в 1747 г. в его знаменитой работе "Размышление о причине теплоты и холода".

Температуру, отсчитываемую по абсолютной шкале, называют абсолютной температурой и выражают ее в градусах абсолютной шкалы ( $^{\circ}\text{K}$ , или  $^{\circ}\text{абс}$ ).

Температура по стоградусной шкале, отсчитываемая от 0  $^{\circ}\text{C}$ , обозначается через  $t$ . Температура по абсолютной шкале, отсчитываемая от температуры абсолютного нуля, обозначается через  $T$ .

Из сделанных определений вытекает зависимость  $T^{\circ}\text{K} = t^{\circ}\text{C} + 273,16$ , или приближенно  $T^{\circ}\text{K} = t^{\circ}\text{C} + 273$ .

## ЗАДАЧИ

1.1 В цилиндре при некотором давлении и температуре воздух содержится в объеме  $0,6 \text{ м}^3$  массой  $0,72 \text{ кг}$ . Найти его плотность.

Ответ:  $1,2 \text{ кг/м}^3$ .

1.2 Найти массу газа объемом  $0,5 \text{ м}^3$ , если известно, что плотность его равна  $1,05 \text{ кг/м}^3$ .

Ответ:  $0,525 \text{ кг}$ .

1.3 Найти объем газа, если масса его  $3 \text{ кг}$ , а плотность  $0,95 \text{ кг/м}^3$ .

Ответ:  $3,16 \text{ м}^3$ .

1.4 Диаметр днища коллектора водотрубного котла  $d = 1,2 \text{ м}$ . Давление пара в котле  $P = 2,5 \text{ МПа}$ . Найти силу, действующую на днище коллектора котла изнутри.

Решение. Площадь днища коллектора котла

$$S = 0,785 \cdot d^2 = 0,785 \cdot 1,2^2 = 1,13 \text{ м}^2$$

Сила, действующая на днище коллектора котла изнутри,

$$F = p \cdot S = P \cdot S = 2,5 \cdot 10^6 \cdot 1,13 = 2,83 \text{ МН}.$$

1.5 Выразить в единицах СИ давления  $367,7$  и  $882,6 \text{ мм рт. ст.}$  и  $300 \text{ мм рт. ст.}$

Решение.  $367,7 \text{ мм рт.ст.} = 367,7 \cdot 133 \text{ Па} = 48,9 \text{ кПа} = 48,9 \cdot 10^3 \text{ Па}$ .

$882,6 \text{ мм рт.ст.} = 882,6 \cdot 133 \text{ Па} = 118 \text{ кПа} = 0,118 \text{ МПа}$ .

$300 \text{ мм рт.ст.} = 300 \cdot 9,81 \text{ Па} = 2,94 \text{ кПа}$ .

1.6 В цилиндре дизеля при сгорании топлива давление увеличивается до  $5,0 \text{ МПа}$ . Найти силу, действующую при этом на крышку цилиндра изнутри, если внутренний диаметр цилиндра равен  $375 \text{ мм}$ .  
 Ответ:  $550 \text{ кН}$ .

1.7 Выразить давление, равное  $100 \text{ кПа}$ , в миллиметрах ртутного столба и в метрах водяного столба.

Ответ:  $750 \text{ мм рт. ст.}$ ;  $10,2 \text{ м вод. ст.}$

1.8 Манометр, установленный на паровом котле, показывает давление  $1,8 \text{ МПа}$ . Найти давление пара в котле, если атмосферное давление  $99 \text{ кПа}$  ( $0,099 \text{ МПа}$ ).

Ответ:  $1,9 \text{ МПа}$ .

1.9 Вакуумметр показывает разрежение  $80 \text{ кПа}$ . Каково должно быть давление в сосуда, если атмосферное давление по барометру составляет  $100 \text{ кПа}$  ?

Ответ:  $20 \text{ кПа}$ .

1.10 Манометр, установленный на паровом котле, показывает давление 0,4 МПа. Чему равно давление пара в котле, если барометр показывает 94,4 кПа ?

Ответ: 0,494 МПа.

1.11 Какое давление испытывает водолаз на глубине 30 м ниже уровня моря, если плотность морской воды равна  $1080 \text{ кг/м}^3$ , а давление атмосферного воздуха - 0,1 МПа ?

Ответ: 0,418 МПа.

1.12 Давление в конденсаторе паровой турбины 12 кПа. Давление атмосферного воздуха - 98,4 кПа. Чему равно давление (разрежение) в конденсаторе паровой турбины ?

Ответ: 86,4 кПа.

1.13 Ртутный вакуумметр, присоединенный к конденсатору, показывает 620 мм рт.ст. Показания ртутного барометра - 770 мм рт.ст. Найти давление в конденсаторе.

Ответ: 19,95 кПа.

1.14 В цилиндрическом резервуаре диаметром  $d = 1 \text{ м}$  и высотой  $= 5,1 \text{ м}$  находится 5,016 кг азота. Определить плотность и удельный объем азота при этих условиях.

Ответ:  $\rho = 1,25 \text{ кг/м}^3$ ;  $v = 0,8 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

1.15 Давление в паровом отопительном котле составляет  $P_a = 2,5 \text{ кгс/см}^2$ , при барометрическом давлении  $B_0 = 720 \text{ мм рт.ст.}$  На сколько процентов изменится абсолютное давление в котле, если показание манометра останется неизменным, а показание барометра дойдет до  $B_0 = 790 \text{ мм рт.ст.}$

Ответ: 2,76 %.

1.16 Высота уровня спирта, хранящегося в вертикальной цилиндрической цистерне, составляет  $h = 4 \text{ м}$  (от дна). В днище цистерны имеется круглый лаз диаметром  $d = 400 \text{ мм}$ , прикрепленный болтами. Определить усилие, приходящееся на болты. Плотность спирта принять равной  $\rho = 816 \text{ кг/м}^3$ .

Ответ: 410 кг.

1.17 Определить, каково будет показание манометра, стоящего на сборнике сжатого воздуха, если абсолютное давление воздуха составляет  $P_a = 10 \text{ кгс/см}^2$ , а барометрическое давление  $B = 750 \text{ мм рт. ст.}$  при температуре  $t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $P_{\text{и}} = 0,898 \text{ МПа}$ .

1.18 U - образный тягомер, поставленный на газоходе цементной вращающейся печи, показывает разрежение  $W = 30 \text{ мм}$ . В тягомере залит керосин ( $\rho = 790 \text{ кг/м}^3$ ). Определить разрежение, мм рт.ст. и абсолютное давление в газоходе, если атмосферное давление  $B = 755 \text{ мм рт.ст.}$



Ответ:  $P_a = 1,02 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ;

$W' = 1,74 \text{ мм рт.ст.}$

1.19 В осушительной башне сернокислотного завода подключен тягомер с наклонной трубкой. Угол наклона трубки  $\alpha = 30^\circ$ . Жидкость в трубке - спирт с плотностью равной  $810 \text{ кг/м}^3$ . Отсчет длины столба спирта по шкале составляет  $I = 200 \text{ мм}$ . Каково давление в дымоходе, если атмосферное давление  $B = 755 \text{ мм рт.ст.}$

Ответ:  $P_a = 749 \text{ мм рт.ст.}$

1.20 Вакуумметр, присоединенный к паропроводу, идущему от вакуумаппарата к конденсатору, показывает разрежение  $W = 480 \text{ мм рт.ст.}$  (при  $0^\circ\text{C}$ ). Над столбиком ртути находится столбик воды высотой  $h = 300 \text{ мм}$ . Показание барометра  $B = 750 \text{ мм рт.ст.}$  Определить истинное давление в паропроводе, Па.

Ответ:  $P_a = 248 \text{ мм рт.ст.} = 3370 \text{ кгс/см}^2$ .

1.21. По трубопроводу диаметром  $d = 50 \text{ мм}$ , присоединенному к газгольдеру, подается газ, удельный объем которого  $v = 0,5 \text{ м}^3/\text{кг}$ . За какое время газ наполнит газгольдер, если его объем  $V = 5 \text{ м}^3$ , средняя по сечению скорость газа в трубопроводе  $\omega = 2,55 \text{ м/с}$ , а плотность газа, заполнившего газгольдер  $\rho = 0,00127 \text{ г/см}^3$  ?

Ответ:  $\tau = 10 \text{ м, } 35 \text{ с.}$

1.22 В паросборнике находится водяной пар в количестве  $300 \text{ кг}$ . Определить объем паросборника, если удельный объем составляет  $20,2 \text{ см}^3/\text{г}$ .

Ответ:  $V = 6,06 \text{ м}^3$ .

1.23 Температура перегретого пара в паропроводе, отсчитанная по азотно-ртутному термометру  $t_1 = 400^\circ\text{C}$  столбик ртути выступает на  $150^\circ\text{C}$ , температура окружающего воздуха  $t_0 = 25^\circ\text{C}$ . Определить истинную температуру перегретого пара.

Ответ:  $t = 408,9^\circ\text{C}$ .

1.24 На трубопроводе холодильного рассола установлен термометр, показывающий  $t = -7,5^\circ\text{C}$ , при этом столбик ртути выступает наружу от температуры  $t = -27,5^\circ\text{C}$ . Температура помещения  $t = 25^\circ\text{C}$ . Определить истинную температуру рассола.

Ответ:  $t = -7,6^\circ\text{C}$ .

1.25. В цилиндрическом резервуаре диаметром  $d = 1 \text{ м}$  и высотой  $h = 5,1 \text{ м}$  находится  $5,016 \text{ кг}$  азота. Определить плотность и удельный объем азота при этих условиях.

Ответ:  $\rho = 1,25 \text{ кг/м}^3$ ;

$v = 0,8 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

1.26. Давление в паровом отопительном котле составляет  $P = 2,5$  кгс/см<sup>2</sup> при барометрическом давлении  $B_0 = 720$  мм рт.ст. На сколько процентов изменится абсолютное давление в котле, если показание манометра останется неизменным а показание барометра дойдет до  $B_0 = 790$  мм рт.ст. ?

Ответ: 2,76 %,

1.27 В трубопроводе, заполненном жидкостью, стоит манометр, показывающий давление  $P = 0,2$  кгс/см<sup>2</sup>. На какую высоту над точкой присоединения манометра поднимется в открытом пьезометре жидкость, находящаяся в трубопроводе, если эта жидкость: а) вода; б) нефть ( $\rho = 850$  кг/м<sup>3</sup>); в) четыреххлористый углерод ( $\rho = 1633$  кг/м<sup>3</sup>).

Ответ:  $h_v = 2$  м;  $h_{CCl_4} = 2,35$  м;  $h_H = 2,35$  м.

1.28 Определить давление воздуха, подаваемого в манжету, для подъема 60-процентной серной кислоты (плотность  $\rho = 1498$  кг/м<sup>3</sup>) на высоту  $h = 30$  м.

Ответ:  $P = 4,5$  кгс/см<sup>2</sup>.

1.29 U - образный тягомер, поставленный на газоходе цементной вращающейся печи, показывает разрежение  $W = 30$  мм. В тягомере залит керосин ( $\rho = 790$  кг/м<sup>3</sup>). Определить разрежение, Н/м<sup>2</sup> и абсолютное давление в газоходе, если атмосферное давление  $B_0 = 755$  мм рт.ст.

Ответ:  $P_a = 753,2$  мм рт.ст. = 1,02 ат.

1.30 К осушительной башне серноокислотного завода подключен тягомер с наклонной трубкой. Жидкость в трубке - спирт с плотностью  $\rho = 610$  кг/м<sup>3</sup>. Отсчет длины столба спирта по шкале составляет  $h = 200$  мм. Каково давление в дымоходе, если атмосферное давление  $B_0 = 755$  мм рт.ст.

Ответ:  $P_{абс} = 749$  мм рт.ст. = 99,84 кПа.

## 2 ИДЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ И ОСНОВНЫЕ ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

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. В действительно существующих газах при высоких температурах и малых давлениях можно пренебречь силами притяжения и объемом самих молекул. Поэтому такие газы можно также называть идеальными.

Основные зависимости, характеризующие соотношения между параметрами идеального газа при некоторых определенных условиях изменения его состояния:

- 1) если температура газа не изменяется (  $T = \text{const}$ ), то давление газа и его удельный объем связаны следующей зависимостью (закон Бойля-Мариотта):

$$P \cdot V = \text{const} ; \quad (2.1)$$

- 2) если давление газа остается постоянным (  $p = \text{const}$ ), то соотношение между удельным объемом газа и его абсолютной температурой подчиняется закону Гей-Люссака:

$$T_1 v_2 = T_2 v_1 ; \quad (2.2)$$

- 3) при  $V = \text{const}$  по закону Шарля

$$P_1 T_2 = P_2 T_1 . \quad (2.3)$$

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

$$PV = GRT ; \quad (2.4)$$

$$PV = RT ; \quad (2.5)$$

$$PV_\mu = 8314T . \quad (2.6)$$

В уравнениях (2.4 - 2.6) приняты следующие обозначения:

$p$  - давление газа, Н/м<sup>2</sup>;

$V$  - объем газа, м<sup>3</sup>;

$G$  - вес газа, кг;

$v$  - удельный объем газа, м<sup>3</sup>/кг;

$V_\mu$  - объем одного моля газа, м<sup>3</sup>/моль;

$R$  - газовая постоянная для 1 кг газа, Дж/кг К.

Каждое из этих уравнений отличается от другого лишь тем, что относится к различным весовым количествам газа. Первое - к  $G$  кг, второе - к 1 кг; третье - к 1 молю газа.

Газовая постоянная, отнесенная к 1 кг газа, определяется из уравнения

$$R = \frac{8314}{\mu} , \frac{\text{Дж}}{\text{кг}^\circ\text{К}} . \quad (2.7)$$

## СМЕСИ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ

Газовые смеси подчиняются закону Дальтона, согласно которому давление  $P_{см}$  смеси идеальных газов равно сумме парциальных давлений  $P_i$ .

Парциальным давлением называется давление, создаваемое отдельным компонентом в полном объеме при температуре смеси. Если объем смеси  $V_{см}$  давление  $P_{см}$ , то парциальное давление отдельного компонента

$$P_i = P_{см} \cdot \frac{V_i}{V_{см}} . \quad (2.8)$$

где  $V_i$  - приведенный объем отдельного компонента при параметрах смеси.

Состав смеси может быть задан одним из следующих способов.

### I Массовый состав смеси:

а) в абсолютных единицах массы

$$G_{см} = G_1 + G_2 + G_3 + \dots + G_n , \quad (2.9)$$

где  $G_1, G_2, G_3$  и т.д, - массы отдельных компонентов смеси;

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = 1 \quad \text{или}$$

$$\sum_{i=1}^n q_i = 1 . \quad (2.10)$$

где  $q_i$  - массовая доля отдельного компонента смеси.

### 2.Объемный состав смеси:

а) в абсолютных единицах объема

$$V_{см} = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n , \quad (2.11)$$

где  $V_1, V_2, V_3$  и т.д - приведенные объемы отдельных компонентов смеси,  $м^3$ ;

б) в относительных долях (объёмных)

$$r_1 + r_2 + r_3 + \dots + r_n = 1 \quad \text{или} \quad \sum_{i=1}^n r_i = 1, \quad (2.12)$$

где  $r_i$  - объемная доля отдельного компонента  $r_i = \frac{V_i}{V_{см}}$ .

Смесь может быть задана числом молей  $M$  как сумма чисел молей  $n$  отдельных компонентов. Мольная доля отдельного компонента равна объемной доле:  $n_i = r_i$ ,

Кажущаяся молекулярная масса смеси

$$\mu_{см} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{q_i}{\mu_i}}, \quad (2.13)$$

где  $\mu_i$  - молекулярная масса отдельных компонентов смеси.

Газовая постоянная смеси

$$R_{см} = \frac{\mu R}{\mu_{см}} = \frac{8314}{\mu_{см}}. \quad (2.14)$$

Соотношение между массовыми и объемными долями

$$r_i = q_i \frac{R_i}{R_{см}}. \quad (2.15)$$

## ЗАДАЧИ

2.1 Процентный массовый состав дымового газа следующий:  $q_{CO_2} = 15 \%$ ,  $q_{O_2} = 6 \%$ ;  $q_{N_2} = 79 \%$ . Найти молекулярный вес газа, газовую постоянную, плотность и удельный объем при нормальных условиях. Найти парциальное давление каждого газа, входящего в смесь, считая давление смеси  $p = 740$  мм рт.ст.

Ответ:  $\mu_{см} = 29,8$ ;  $v_{см} = 0,751$  м<sup>3</sup>/кг;  $\rho = 1,33$  кг/м<sup>3</sup>;

$$P_{CO_2} = 9997,5 \text{ Па}$$

2.2 Найти давление смеси по манометру, если масса ее  $M = 20$  кг;  $V = 4$  м<sup>3</sup>;  $t = 100$  °С, причем состав смеси по объему  $r_{O_2} = 0,4$ ;  $r_{CO_2} = 0,6$ .

Ответ: 0,297 МПа.

2.3 Анализом определен объемный состав газовой смеси:  $r_{CO_2} = 0,12$ ;  $r_{O_2} = 0,05$ ;  $r_{H_2O} = 0,03$ ;  $r_{N_2} = 0,80$ . Определить плотность и удельный объем смеси при нормальных условиях, молекулярный вес, газовую постоянную и относительный массовый состав ее.

Ответ:  $\mu_{см} = 29,8$ ;  $v_{см} = 0,752$  м<sup>3</sup>/кг;  $\rho_{см} = 1,33$  кг/м<sup>3</sup>;  $q_{CO_2} = 0,177$  и т.д.

2.4 Смесь состоит из 50 кг дымовых газов, массовый состав которых:  $CO_2 = 14 \%$ ;  $O_2 = 6 \%$ ;  $H_2O = 5 \%$ ;  $N_2 = 75 \%$  и 75 кг воздуха. Определить массовый и объемный составы смеси, если массовый состав воздуха:  $O_2 = 23,2 \%$ ;  $N_2 = 76,8 \%$ .

Ответ:  $q_{N_2} = 0,761$  и т.д.;  $r_{N_2} = 0,78$  и т.д.

2.5 Состав горючего газа по массе:  $H_2 = 1,5 \%$ ;  $CO = 28 \%$ ;  $CO_2 = 10,0 \%$ ;  $N_2 = 60,5 \%$ . Определить объемный состав, плотность и удельный объем при  $P = 0,2$  МПа и  $t = 100$  °С, а также количество киломолей в 1 т

смеси.

Ответ:  $r_{N_2} = 0,525$  и т.д.;

$v_{см} = 0,655 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $\rho_{см} = 1,53 \text{ кг/м}^3$ ;  $K_{см} = 41,4 \text{ кмоля}$ .

2.6 До какого давления по манометру нужно довести смесь газов, состоящую из  $r_{O_2} = 0,14$ ;  $r_{N_2} = 0,25$  и  $r_{CO} = 0,61$ , чтобы парциальное давление в ней составляло  $P_{N_2} = 0,12 \text{ МПа}$ ? Какое давление при этом будет иметь CO? Принять  $B = 780 \text{ мм рт. ст.}$

Ответ:  $0,73 \text{ МПа}$ ,  $0,513 \text{ МПа}$ .

2.7. Для светильного газа анализ дал следующий состав в объемных долях: 50 %  $H_2$ ; 30 %  $CH_4$ ; 15 % CO; 3 %  $CO_2$ ; 2 %  $N_2$ . Чему равны газовая постоянная и средний молекулярный вес этого газа? Каков состав в весовых долях и чему равна плотность газа при  $25^\circ\text{C}$  и давлении  $750 \text{ мм рт.ст.}$

Ответ:  $R_{см} = 0,698 \text{ кДж/кг К}$ ;  $\rho_{см} = 0,461 \text{ кг/м}^3$ .

2.8 Определить объем 3 кг смеси, относительный массовый состав которой следующий:  $q_{O_2} = 0,4$ ;  $q_{N_2} = 0,2$ ;  $q_{CO_2} = 0,4$ . Температура смеси  $t = 50^\circ\text{C}$ , давление по манометру  $P = 600 \text{ мм рт.ст.}$  Давление атмосферы нормальное.

Ответ:  $V = 2,38 \text{ м}^3$ .

2.9 Определить массу  $4 \text{ м}^3$  смеси, относительный объемный состав которой следующий:  $r_{O_2} = 0,4$ ;  $r_{N_2} = 0,2$ ;  $r_{CO_2} = 0,4$ . Температура смеси  $t = 50^\circ\text{C}$ ; давление по манометру  $P = 0,04 \text{ МПа}$   $B = 700 \text{ мм рт. ст.}$  ( $93,325 \text{ кПа}$ ).

Ответ:  $7,07 \text{ кг}$ .

2.10 Дымовые газы поступают в первый ход котла при  $t_1 = 1200^\circ\text{C}$ , а выходят при  $t_2 = 800^\circ\text{C}$ . Состав газов по объему:  $r_{CO_2} = 12\%$ ;  $r_{O_2} = 5\%$ ;  $r_{H_2O} = 8\%$ , остальное азот. Вычислить количество теплоты, теряемое  $1 \text{ м}^3$  (при нормальных условиях) газовой смеси, считая зависимость  $C_p = f(t)$  нелинейной.

Ответ:  $160 \text{ ккал/м}^3$  ( $670,4 \text{ кДж/м}^3$ ),

### 3 ТЕПЛОЕМКОСТЬ ГАЗОВ

Теплоемкостью называют количество тепла, которое необходимо сообщить телу (газу), чтобы повысить температуру какой-либо количественной единицы его на  $1^\circ\text{C}$ .

В зависимости от выбранной количественной единицы различают весовую теплоемкость ( $C$  - кДж/кг К), объемную теплоемкость ( $C'$  - кДж/м<sup>3</sup> К) и мольную теплоемкость ( $\mu C$  - кДж/моль К).

Для определения значений этих теплоемкостей достаточно знать значение одной какой-либо из них. Удобнее всего иметь значение мольной теплоемкости.

Весовая теплоемкость тогда определяется из выражения

$$C = \frac{\mu \cdot C}{\mu}, \quad \text{кДж/кг К}, \quad (3.1)$$

а объемная теплоемкость получается равной

$$C' = \frac{\mu \cdot C}{22,4}, \quad \text{кДж/нм}^3\text{К}. \quad (3.2)$$

Объемная и весовая теплоемкости связаны между собой следующей зависимостью.

$$C' = C\rho. \quad \text{кДж/нм}^3\text{К}, \quad (3.3)$$

где  $\rho$  - плотность газа при нормальных условиях.

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

Если  $q$  - количество тепла, сообщаемое единице количества газа (или отнимаемое от него) при изменении температуры газа от  $t_1$  до  $t_2$  (или, что то же, от  $T_1$  до  $T_2$ ), то величина

$$C_m = \frac{q}{t_2 - t_1}, \quad (3.4)$$

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

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

Теплоемкость идеальных газов зависит не только от их температуры, но и 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 нагрева (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 теплоемкость:

а) весовую - при постоянном объеме ( $C_v$  и  $C_{vm}$ ) и постоянном давлении ( $C_p$  и  $C_{pm}$ );

б) объемную - при постоянном объеме ( $C'_v$  и  $C'_{vm}$ ) и постоянном давлении ( $C'_p$  и  $C'_{pm}$ );

в) мольную - при постоянном объеме ( $\mu C_v$  и  $\mu C_{vm}$ ) и постоянном давлении ( $\mu C_p$  и  $\mu C_{pm}$ ).

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

$$\mu C_p - \mu C_v = \mu R = 8,314 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}^\circ\text{К}}. \quad (3.5)$$

Отношение теплоемкостей  $\frac{C_p}{C_v}$ , обозначаемое буквой  $K$ , называется показателем адиабаты:

$$K = \frac{C_p}{C_v}. \quad (3.6)$$

Этот показатель играет в термодинамике большую роль. Показатель адиабаты зависит от атомности газа. Для одноатомных газов  $K = 1,6$ , двухатомных -  $K = 1,4$ , трехатомных -  $K = 1,3$ .

### ЗАДАЧИ

3.1 Определить значение объемной теплоемкости кислорода при постоянном объеме и постоянном давлении, при  $t = 200^\circ\text{C}$ .

3.2. Определить значение весовой теплоемкости кислорода при постоянном объеме и постоянном давлении при  $t = 500^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $C_p = 0,92 \text{ кДж/кг К}$ ;  $C_v = 0,6536 \text{ кДж/кг К}$ .

3.3 Определить среднюю весовую теплоемкость углекислого газа при постоянном давлении в пределах от 0 до  $825^\circ\text{C}$ , считая зависимость от температуры криволинейной.

Ответ:  $C_{pm} = 1,1 \text{ кДж/кг К}$ .

3.4 Вычислить среднюю теплоемкость  $C_{pm}$  для воздуха при постоянном давлении в пределах от 200 до  $800^\circ\text{C}$ , считая зависимость теплоемкости от температуры криволинейной.

Ответ;  $C_{vm} = 1,09 \text{ кДж/кг К}$ ,

3.5 Найти среднюю теплоемкость  $C_{pm}$  и  $C'_{pm}$  углекислого газа в пределах от 400 до  $1000^\circ\text{C}$ , считая зависимость теплоемкости от температуры криволинейной.

Ответ:  $C_{pm} = 1,24 \text{ кДж/кг К}$ ;



$$C'_{pm} = 2,4 \text{ кДж/нм}^3 \text{ К.}$$

3.6 Определить среднюю весовую теплоемкость при постоянном объеме для азота в пределах от 200 до 800 °С, считая зависимость теплоемкости от температуры криволинейной.

Ответ:  $C_{vm} = 0,82 \text{ кДж/кг К.}$

3.7 Найти количество тепла, необходимое для нагрева 1 нм<sup>3</sup> воздуха от 400 до 1000 °С при  $P = \text{const}$ , считая зависимость теплоемкости от температуры криволинейной.

Ответ:  $q_p = 878,6 \text{ кДж/нм}^3.$

3.8 В закрытом сосуде объемом  $V = 300 \text{ л}$  находится воздух при давлении  $P_1 = 3 \text{ ата}$  и температуре  $t_1 = 20 \text{ °С}$ .

Какое количество тепла необходимо подвести для того, чтобы температура воздуха поднялась до  $t_2 = 120 \text{ °С}$ ? Задачу решить, принимая теплоемкость воздуха постоянной.

Ответ:  $Q_v = 76 \text{ кДж.}$

3.9 Найти количество тепла, необходимое для нагрева 1 нм<sup>3</sup> смеси газов от 200 до 1200 °С при  $P = \text{const}$ , если состав смеси по объему следующий:  $\text{CO}_2 = 14,5 \text{ \%}$ ;  $\text{O}_2 = 6,5 \text{ \%}$ ;  $\text{N}_2 = 79,0 \text{ \%}$ .

Ответ:  $q_p = 558 \text{ кДж/нм}^3.$

3.10 В калориметре с идеальной тепловой изоляцией находится вода в количестве  $G_v = 0,8 \text{ кг}$  при температуре  $t' = 15 \text{ °С}$ . Калориметр изготовлен из серебра, теплоемкость которого  $C_c = 0,24 \text{ кДж/кг К}$ .

Вес калориметра  $G_k = 0,25 \text{ кг}$ , В калориметр опускают 200 г алюминия при температуре  $t_k = 100 \text{ °С}$ . В результате этого температура воды повышается до  $t'' = 19,24 \text{ °С}$ . Определить теплоемкость алюминия.

Ответ:  $C_a = 0,9 \text{ кДж/кг К.}$

## 4 ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

Первый закон термодинамики является частным случаем закона сохранения и превращения энергии.

Для конечных тепловых процессов, в которых рабочее тело не изменяет своей внешней кинетической энергии, уравнение 1-го закона термодинамики для 1 кг газа имеет вид в системе СИ

$$q = \Delta U + l \quad (4.1)$$

где  $q$  - теплота процесса, Дж/кг;

$\Delta U$  - изменение внутренней энергии, Дж/кг;

$l$  - работа расширения, Дж/кг.

В технической термодинамике учитывают только внутреннюю кинетическую энергию газа, зависящую от скорости движения его частиц и их массы, и внутреннюю потенциальную энергию, зависящую от сил взаимодействия атомов и молекул и их взаимного расположения.

Нужно усвоить, что внутренняя энергия есть однозначная функция термодинамического состояния рабочего тела, и поэтому изменение внутренней энергии не зависит от характера протекания процесса, а зависит только от начального и конечного состояния рабочего тела.

Изменение внутренней энергии идеального газа зависит только от температуры и для 1 кг газа определяется по формуле:

$$\Delta U = C_{vm}(t_2 - t_1) \quad (4.2)$$

Работа расширения 1 - есть функция процесса: графически в координатах P-V она изображается площадью под кривой процесса, ограниченной осью абсцисс и ординатами, опущенными на эту ось из точек, характеризующих начало и конец процесса. Математическое выражение работы расширения имеет вид  $l = \int_1^2 P \cdot dV$ , из которого получаются необходимые формулы для каждого конкретного процесса.

## ЗАДАЧИ

4.1 В цилиндре диаметром 0,2 м под поршнем находится газ. При сообщении теплоты поршень приподнялся на 0,4 м. Масса груза с поршнем составляет 200 кг. Определить работу, совершенную газом, количество подведенной теплоты и изменение внутренней энергии газа, если  $\frac{Q}{\Delta U} = 1,4$ .

Ответ:  $L = 80 \text{ кгм} = 0,785 \text{ кДж}$ ;

$$\Delta U = 0,468 \text{ ккал} = 1,96 \text{ кДж};$$

$$Q = 0,655 \text{ ккал} = 2,745 \text{ кДж}.$$

4.2 В процессе расширения 1 кг кислорода подводится 200 кДж теплоты. Какую работу совершит при этом газ, если в результате процесса температура его понизится на 95°C. Зависимость теплоемкости от температуры не учитывать ( $C_v = 0,654 \text{ кДж/кг К}$ ).

Ответ: 262 кДж/кг.

4.3 Определить изменение температуры 10 кг нефтяного масла при его нагревании и перемешивании, если известно, что количество подводимой теплоты  $Q = 200 \text{ кДж}$  и работа перемешивания  $L = 36 \text{ кДж}$ . Теплоемкость масла 2 кДж/ кг К.

Ответ:  $\Delta t = 11,6^\circ\text{C}$ .

4.4 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  $200\text{ кг}$  при падении его с высоты  $2\text{ м}$  ? Предполагается, что вся энергия падения молота превращается в теплоту, целиком поглощаемую свинцом. Теплоемкость свинца  $C_p = 0,1256\text{ кДж/кг К}$ .

Ответ:  $0,0969\text{ кг}$ .

4.5 Свинцовый шар падает с высоты  $80\text{ м}$  на твердую поверхность. При этом кинетическая энергия шара переходит в теплоту,  $80\%$  которой им усваивается. На сколько градусов нагревается при падении шар? Теплоемкость свинца  $C_p = 0,1256\text{ кДж/кг К}$ .

Ответ: на  $5\text{ К}$ .

4.6 Испытание двигателя ведется при помощи присоединенного к нему генератора. Напряжение на клеммах генератора постоянного тока  $U = 220\text{ В}$ , сила тока  $I = 50\text{ А}$ , к.п.д. генератора  $\zeta = 0,98$ . Определить мощность двигателя на валу.

Ответ:  $N = 11,2\text{ кВт}$ .

4.7. Газ, состояние которого определяется на  $P, v$ - диаграмме рисунок 4.1 точкой 1, переводится в состояние 2 по пути 1 с 2. При этом к газу подводится  $80\text{ кДж}$  энергии в виде теплоты и от газа получается  $30\text{ кДж}$  работы. Затем этот же газ возвращается в исходное состояние в процессе, который описывается кривой 2a1. Сколько энергии в виде теплоты нужно подвести в некотором другом процессе 1d2, чтобы от газа получить  $10\text{ кДж}$  работы? Сколько нужно подвести или отвести теплоты в процессе 2a1, если на сжатие расходуется  $50\text{ кДж}$  энергии в форме работы? Ответ:  $Q_{1d} = 60\text{ кДж}$ ;  $Q_{2c1} = 100\text{ кДж}$ .

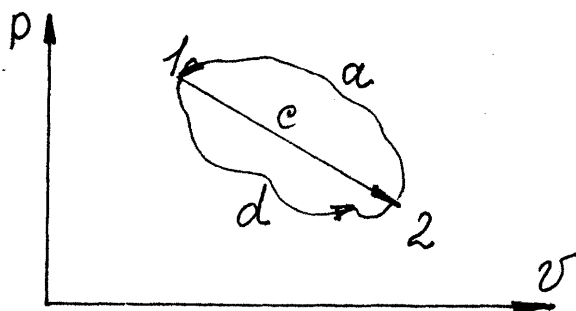


Рисунок 4.1 - Изменение состояния газа в процессах

4.8 Состояние газа под поршнем в цилиндре определяется точкой 1 рисунок 4.2. Газ переводится в состояние 2 один раз по пути 1a2 и второй - по пути 1b2. Определить, будут ли отличаться в этих процессах количества

отведенной и подведенной теплоты, и если да, то насколько. Известно, что давления в точках 1 и 2 равны 0,1 и 0,5 МПа соответственно, а изменение объема  $V_2 - V_1 = 0,5 \text{ м}^3$ .

Ответ:  $Q_{1a2} - Q_{1b2} = 200 \text{ кДж}$

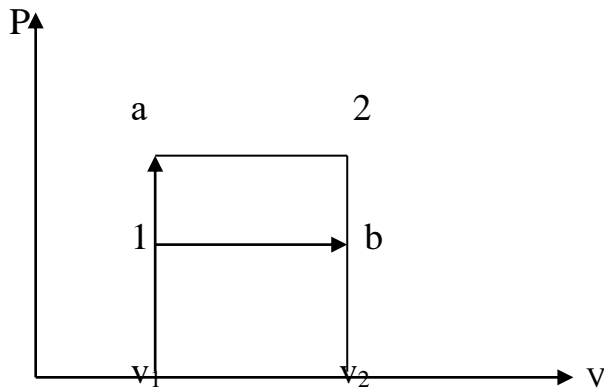


Рисунок 4.2 - Изменение состояния газа в процессах

4.9 Определить к.п.д. двигателя автомобиля мощностью 44,0 кВт при расходе топлива 7,4 кг/ч.

Теплоту сгораемого топлива принять равной 40 МДж/кг.

Ответ:  $\zeta = 0,538$ .

4.10 Мощность электростанции на выходных шинах составляет 12 мВт. Какое количество топлива  $B$ , кг/ч сжигается в топках котлов электростанции, если все потери энергии на станции составляют 70 %, а теплота сгорания топлива  $Q_H = 30 \text{ МДж/кг}$ .

Ответ:  $B = 4800 \text{ кг/ч}$ .

4.11 Определить суточный расход топлива на электростанции мощностью  $N = 100 \text{ мВт}$ , если ее к.п.д.  $\zeta_{ст} = 0,35$ , а теплота сгорания топлива  $Q_H^p = 30 \text{ МДж/кг}$ .

Определить также удельный расход топлива на 1 мДж выработанной энергии.

Ответ:  $B_{сут.} = 823 \text{ т/сут.}; B = 0,0953 \text{ кг/МДж}$ .

4.12 На электростанции мощностью  $N = 100 \text{ мВт}$  сжигается топливо с теплотой сгорания  $Q_H^p = 30 \text{ МДж/кг}$ . Коэффициент полезного действия станции  $\zeta_{ст} = 33,0 \%$ .

Определить часовой расход топлива  $B$ .

Ответ:  $B = 36,4 \text{ т/ч}$ .

4.13 Паровая турбина расходует 0,00110 кг пара на получение 1 кДж электроэнергии. На производство 1 кг пара необходимых параметров затрачивается 3300 кДж.

Определить к.п.д. паротурбинной установки.

Ответ:  $\zeta = 27,6 \%$ .

4.14. Газ, имеющий массу  $G = 1$  кг, находится под поршнем цилиндра в состоянии 1 рисунок 4.3 с параметрами  $P_1 = 0,5$  МПа и

$v_1 = 0,100$  м<sup>3</sup>/кг. Он может перейти в состояние 2 с параметрами  $P_2 = 0,1$  МПа и  $v_2 = 0,262$  м<sup>3</sup>/кг посредством процесса 1a2 и 162. Процесс 1a2 протекает без теплообмена, его уравнение  $P = C_v^{-\frac{5}{3}}$ . Процесс 162 характерен тем, что при его осуществлении теплота сначала подводится к газу, а затем отводится от него. В процессе 162 давление зависит от объема линейно. Определить работу, которую совершает газ, если происходит процесс 1a2. Какое количество теплоты, подведенное к газу в процессе 162 или отведенное, больше по своему абсолютному значению и насколько ?

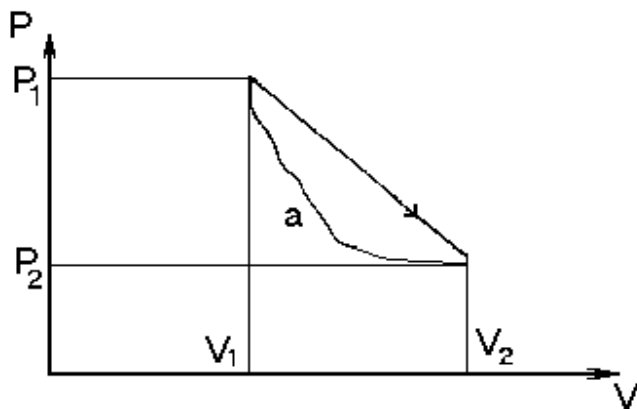


Рисунок 4.3 – Изменение состояния газа в процессах

Ответ:  $l_{1a2} = 35,7$  кДж/кг;  $|q_{подв}| - |q_{отв}| = 12,9$  кДж/кг.

4.15 Свинцовый шар падает с высоты  $h = 100$  м на твердую поверхность. В результате падения кинетическая энергия шара полностью превращается в тепло. Одна треть образовавшегося тепла передается окружающей среде, а две трети расходуются на нагревание шара. Теплоемкость свинца  $C_v = 0,1257$  кДж/кг К. Определить повышение температуры шара.

Ответ:  $\Delta T = 5,2$  К.

4.16 Предполагая, что все потери водяной турбины превращаются в тепло и тратятся на нагревание воды, определить к.п.д. турбины по следующим данным: высота падения воды равна 400 м, нагревание воды 0,2 °С.

Ответ:  $\zeta = 78,6 \%$ .

4.17 В машине вследствие плохой смазки происходит нагревание 200 кг стали на 40 °С в течение 20 мин.

Определить вызванную этим потерю мощности машины. Теплоемкость стали принять равной 0,4609 кДж/кг К.

Ответ: 4,18 л.с.

4.18 Найти изменение внутренней энергии 1 кг воздуха при переходе от начального состояния его  $t_1 = 300^\circ\text{C}$  в конечное при  $t_2 = 50^\circ\text{C}$ . Зависимость теплоемкости от температуры принять прямолинейной.

Ответ:  $\Delta U = 185,4$  кДж/кг.

4.19 Найти изменение внутренней энергии 2 м<sup>3</sup> воздуха, если температура его понижается от  $t_1 = 250^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 50^\circ\text{C}$ . Зависимость теплоемкости от температуры принять прямолинейной. Начальное давление воздуха  $P_1 = 6$  ата.

Ответ:  $\Delta U = 1042,89$  кДж.

4.20 К газу, заключенному в цилиндре с подвижным поршнем, подводится извне 20 ккал тепла. Величина произведенной работы при этом составляет 10000 кгм.

Определить изменение внутренней энергии газа, если количество его равно 0,8 кг.

Ответ:  $\Delta U = -17,43$  кДж/кг.

## 5 ПОЛИТРОПНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Политропными процессами называются процессы, подчиняющиеся уравнению вида  $PV^n = \text{const}$ , где  $n$  - показатель политропы, принимающий значения от  $-\infty$  до  $+\infty$ .

Изобарный, изотермический, изохорный и адиабатный процессы являются частными случаями политропных процессов.

Показатель политропы этих процессов принимает следующие значения:

- а) изобарный процесс  $n=0$ , уравнение процесса  $PV^0 = \text{const}$ ;
- б) изотермический процесс  $n=1$ , уравнение процесса  $PV^1 = \text{const}$ ;
- в) адиабатный процесс  $n=\kappa$ , уравнение процесса  $PV^\kappa = \text{const}$ ;
- г) изохорный процесс  $n=\infty$ , уравнение процесса  $PV^\infty = \text{const}$

Формулы расчета термодинамических процессов приведены в таблице 5.1.

### ЗАДАЧИ

5.1 Воздух охлаждается от 800 до 100 °С в процессе  $P = \text{const}$ . Считая зависимость  $C = f(t)$  нелинейной, подсчитать отдаваемое им количество теплоты на 1 м<sup>3</sup>.

Ответ: 976,3 кДж/м<sup>3</sup>.

5.2 В процессе  $P = \text{const}$  к газу теплота подводится так, что температура газа поднимается от  $t_1 = 100^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 700^\circ\text{C}$ . Найти количество подведенной теплоты, изменение внутренней энергии и работу, если  $P = 0,2$  МПа, а  $V_1 = 3$  м<sup>3</sup>. Задачу решить, определяя количество газа один раз по массе, а другой раз по объему. Теплоемкость принять переменной, считая зависимость  $C = f(t)$  линейной.

Ответ:  $q = 3490$  кДж;  $\Delta U = 2547,5$  кДж;  $l = 945$  кДж;  $V_2 = 7,82$  м<sup>3</sup>.

5.3 2 кг воздуха, начальные параметры которого  $P_1 = 10$  ат и  $t_1 = 400$  °С, расширяются до тех пор, пока объем не увеличится в 3 раза. Определить начальные и конечные параметры, количество теплоты в процессе, изменение внутренней энергии и работу, если расширение происходит: 1) изотермически; 2) по адиабате; 3) по политропе  $n = 1,2$ ; 4) по политропе  $n = 1,6$  ( $C_v = 0,722$  нДж/кг).

Ответ: 1)  $l = 427$  кДж;  $P_2 = 0,3$  МПа;

2)  $P_2 = 0,21$  МПа;  $T_2 = 432$  К;  $l = 344$  кДж;  $\Delta U = 344$  кДж;

3)  $P_2 = 0,262$  МПа;  $T_2 = 538$  К;  $l = 390$  кДж;  $\Delta U = -194,9$  кДж;  $q = 195$  кДж;

4)  $P_2 = 1,72$  ат;  $T_2 = 346$  К;  $l = 314$  кДж;  $\Delta U = -473$  кДж;  $q = -159$  кДж.

5.4 В цилиндре воздух сжимается по адиабате так, что объем уменьшается в 5 раз. Начальное давление  $P_1 = 1$  ат; начальная температура  $t_1 = 90$  °С. Определить конечную температуру и давление воздуха.

Ответ:  $C \neq const$  (нелинейная зависимость);

$T_2 = 675$  К;  $P_2 = 0,9$  МПа.

5.5 В цилиндре дизеля происходит сжатие воздуха по адиабате. Определить конечные давление и температуру, если объем уменьшается в 15 раз. Принять  $P_1 = 1$  ат и  $t_1 = 90$  °С.

Ответ:  $C \neq const$  (нелинейная зависимость);  $T_2 = 993$  К;  $P_2 = 41$  МПа.

5.6 В цилиндре сжимают воздух так, чтобы его конечная температура была выше температуры воспламенения топлива, равной 750 °С. Сжатие происходит по адиабате. Начальное давление  $P_1 = 1$  ат. Начальная температура  $t_1 = 90$  °С. Определить минимальное конечное давление и степень сжатия.

Ответ: 3,7 МПа; 13,4 ( $C = const$ ); 4,5 МПа; 16,3 ( $C \neq const$ ).

Таблица 5.1 – Формулы для расчёта термодинамических процессов

Процесс	Соотношение между параметрами	Работа, Дж/кг	Теплота, Дж/кг теплоёмкость, Дж/кг	Изменение энтропии Дж/(кг К)
Изохорический $V = const$	$P_1 T_2 = P_2 T_1$	$l = 0$	$q = C_v (T_2 - T_1); C = C_v$	$\Delta S = C_v \ln \frac{T_2}{T_1}$
Изобарический $P = const$	$V_1 T_2 = V_2 T_1$	$l = P(V_2 - V_1)$	$q = C_p (T_2 - T_1) = h_2 - h_1;$ $C = C_p$	$\Delta S = C_p \ln \frac{T_2}{T_1}$
Изотермический $PV = const$	$P_1 V_1 = P_2 V_2$	$l = RT \ln \frac{P_1}{P_2}$	$q = l \cdot C = \pm \infty$	$\Delta S = R \ln \frac{P_1}{P_2} = R \ln \frac{V_2}{V_1}$
Адиабатический $PV^K = const$	$P_1 V_1^K = P_2 V_2^K$ $T_1 V_1^{K-1} = T_2 V_2^{K-1}$	$l = \frac{R}{K-1} (T_1 - T_2)$	$q = 0;$ $C = 0$	$\Delta S = 0$
Политропический $PV^n = const$	$P_1 V_1^n = P_2 V_2^n$ $T_1 V_1^{\frac{n-1}{n}} = T_2 V_2^{\frac{n-1}{n}}$ $T_1 P_2^{\frac{n-1}{n}} = T_2 P_1^{\frac{n-1}{n}}$	$l = \frac{R}{n-1} (T_1 - T_2)$	$q = C_v \frac{n-\kappa}{n-1} (T_2 - T_1)$ $C_n = C_v \frac{n-\kappa}{n-1}$	$\Delta S = C_v \frac{n-\kappa}{n-1} \ln \frac{T_2}{T_1}$



5.7 Политропный процесс расширения идет с показателями  $n = 0,8$ ;  $n = 1,2$ ;  $n = 1,6$ .

Исследовать процессы и показать относительное расположение политроп в  $T, s$  - диаграмме.

5.8 Воздух при нормальных условиях сжимают по адиабате до давления  $P_2 = 0,3$  МПа и затем охлаждают при постоянном давлении до  $t_3 = 0$  °С. Какую работу нужно совершить для получения 1 м<sup>3</sup> воздуха при конечных параметрах ( $\kappa = \text{const}$ )?

Ответ: 370 кДж.

5.9 В цилиндре объемом  $V = 0,01$  м<sup>3</sup>, закрытом поршнем, находится воздух при  $P_1 = 1,0$  МПа и  $T_1 = 298$  К. Воздух может расширяться до 0,1 МПа;

а) изотермически; б) адиабатически; в) политропно  $n = 1,3$ . Определить конечный объем, температуру и совершаемую газом работу. Как велика в случаях "а" и "б" подводимая теплота?

Ответ: а)  $T_1 = T_2$ ;  $l = 198$  кДж/кг;

б)  $T_2 = 154$  К;  $l = 107$  кДж/кг; в)  $T_2 = 175$  К;  $l = 118$  кДж/кг.

5.10 Компрессорная установка должна ежедневно производить 1000 м<sup>3</sup> сжатого воздуха при давлении 1,5 МПа, сжимая его от  $P_1 = 0,1$  МПа и  $t_1 = 20$  °С. Какая мощность в кВт потребуется компрессору, если считать, что потери в нём отсутствуют и если сжатие будет производиться: а) изотермически; б) адиабатно; в) политропно с  $n = 1,3$ ? Сколько теплоты должно отводиться в случаях "а" и "в"? Процессы представить в  $T, s$  - диаграмме.

5.11 Во сколько раз изменится абсолютное значение работы адиабатного сжатия 1 кг идеального газа, для которого  $\kappa = 1,4$ , начальная температура  $T_1$  и давление  $P_1 = 0,1$  МПа, если конечное давление  $P_2$  в первом процессе равно 1 МПа, а в других увеличивается в 10, 100, 1000 раз?

Как изменится значение работы, если начальная абсолютная температура газа увеличится в 10 раз?

Ответ: 1) соответственно в 2,93; 6,67 и 13,87 раза; 2) при увеличении  $T_1$  в 10 раз во столько же раз возрастет значение работы.

5.12 При адиабатном расширении 1 кг воздуха ( $\kappa = 1,40 = \text{const}$ ) температура его падает на 120 К.

Какова полученная в процессе расширения работа и сколько теплоты следовало бы подвести к воздуху, чтобы ту же работу получить в изотермическом процессе?

Ответ:  $l_{ad} = q_{изот.} = 86,1$  кДж/кг.

5.13 Какова начальная температура азота, если конечная температура после совершения процесса адиабатного сжатия  $t_2 = 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Известна степень сжатия  $E = \frac{V_1}{V_2} = 10$ .

Теплоемкости считать постоянными.

Ответ:  $t_1 = 135\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

5.14 Азот из баллона емкостью  $0,05\text{ м}^3$  выпускается в атмосферу настолько быстро, что теплообмен между ней и азотом в баллоне не успевает совершаться. До выпуска давление в баллоне было  $P_1 = 1,2\text{ МПа}$  и температура  $t_1 = 27,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . После закрытия вентиля температура в баллоне стала  $t_2 = 0,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Какова масса выпущенного азота и каким стало давление в баллоне после выпуска?

Ответ:  $\Delta G = 1,413\text{ кг}$ ;  $P_2 = 8,63\text{ МПа}$ .

5.15 В баллоне объемом  $40\text{ л}$  находится сжатый кислород при  $P_1 = 14,0\text{ МПа}$  и при температуре среды. После быстрого открытия выпускного вентиля кислород вытекает в атмосферу; затем вентиль снова закрывается. Теплообмен между содержимым баллона и средой за время выпуска практически не успевает совершаться. Давление в баллоне  $P_2$  после выпуска пара оказывается  $7,0\text{ МПа}$ . Через некоторое время температура кислорода снова становится равной температуре среды  $t_1 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Какой стала температура кислорода в баллоне сразу после выпуска? Какое количество кислорода вытекало из баллона? Чему стало равным давление после восстановления первоначальной температуры? Какое количество кислорода может вытечь, если выпуск производить очень медленно при постоянной температуре газа и конечном давлении  $P_2 = 7,0\text{ МПа}$ ?

Ответ: после выпуска  $t_2 = -33\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

выпущено  $\Delta G_{\text{ад}} = 2,86\text{ кг}$  кислорода;  $P_2 = 8,55\text{ МПа}$ ; при изотермическом выпуске  $\Delta G_{\text{азот}} = 3,68\text{ кг}$ .

5.16 Некоторый процесс расширения кислорода характеризуется тремя равновесными состояниями, для которых параметры имеют следующие значения:

$$1) p_1 = 2\text{ МПа}, t_1 = 487\text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$2) p_2 = 1\text{ МПа}, V_2 = 0,213\text{ м}^3/\text{кг};$$

3)  $V_3 = 0,300\text{ м}^3/\text{кг}$ ,  $t^3 = 576\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Определить, является ли этот процесс политропным? Если да, то чему равен показатель политропы?

Ответ: процесс политропный,  $n = 0,900$ .

5.17. При сжатии воздуха подведено 50 кДж/кг теплоты. В конце политропного процесса температура воздуха увеличилась на 100°C. Определить показатель политропы сжатия. Подсчитать процентное соотношение между работой, теплотой и изменением внутренней энергии. Изобразить в P,V-диаграмме примерный ход процесса.

Ответ:  $n = 2,316$ ;  $Q = 69,6 \%$  ;

$$\Delta U = 30,4 \%$$

## 6 ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

Первый закон термодинамики, устанавливая эквивалентность различных форм энергии, соотношение между изменением внутренней энергии системы, количеством подведенной теплоты и совершенной работы, не позволяет в то же время решить вопрос о возможности осуществления того или иного процесса, о направлении его развития и о глубине его протекания.

Превращение работы в теплоту происходит всегда полностью и безусловно: обратный же процесс превращения теплоты в работу при непрерывном ее переходе возможен лишь при некоторых определенных условиях и при том же всегда полностью.

Для более полного анализа явлений и процессов необходимо к первому закону термодинамики добавить еще одну общую закономерность, позволяющую определить их качественные особенности. Этой цели служит второй закон термодинамики, который устанавливает, возможен или невозможен тот или иной процесс, в каком преимущественном направлении он будет протекать, когда система достигает термодинамического равновесия, и при каких условиях от системы можно получить максимальную работу

$$dq \geq T \cdot dS$$

Это соотношение, справедливое и для обратимых (знак равенства) и для необратимых (знак неравенства) процессов в любой системе, и представляет собой аналитическое выражение второго закона термодинамики.

### ЗАДАЧИ

6.1 Определить термический к.п.д. четырехпроцессного цикла, если работа и теплота, участвующие в каждом процессе, равны:

Процесс .....	1	2	3	4
$l$ , кДж/кг .....	3	10	-8	0
$q$ , кДж/кг .....	30	-10	-20	5

Ответ:  $\zeta_t = 0,143$ .

6.2 Определить термический к.п.д. теплового двигателя, работающего по обратимому циклу Карно. Температура подвода тепла  $500^\circ\text{C}$ , температура отвода тепла  $20^\circ\text{C}$ . Определить также, сколько подводится и сколько отводится теплоты в этом двигателе, если мощность его  $N = 5$  МВт.

Ответ:  $\zeta_t = 0,621$ ;  $q_1 = 8060$  кДж/с;  $q_2 = 3060$  кДж/с.

6.3 30 л воды при температуре  $90^\circ\text{C}$  смешивается с 20 л воды при температуре  $15^\circ\text{C}$ .

Определить вызванное этим процессом изменение энтропии. Теплоемкость воды принять равной  $4,178$  кДж/кг К. Считать, что тепловые потери отсутствуют.

Ответ:  $\Delta S = 1,41$  кДж/кг.

6.4 Стальной шар массой  $10$  кг при  $500^\circ\text{C}$  погружают в сосуд с  $18$  кг воды, температура которой равна  $15^\circ\text{C}$ .

Определить изменение энтропии системы в этом процессе. Считать, что тепловые потери отсутствуют. Теплоемкость стали принять равной  $0,5129$  кДж/кг К, теплоемкость воды  $4,187$  кДж/кг К.

Ответ:  $\Delta S = 3,13$  кДж/К.

6.5 Камень массой  $G = 1,2$  кг падает с высоты  $h = 14$  м на землю.

Определить вызванное этим изменение энтропии системы камень-земля. Температура камня и окружающей среды равна  $20^\circ\text{C}$ .

Решение. Изменение энтропии системы в данном необратимом процессе можно вычислить из формулы потери работоспособности. Потеря работоспособности равна убыли потенциальной энергии, т.е.

$$\Delta L = T_0 \cdot dS = mgh, \text{ отсюда } \Delta S = \frac{mgh}{T_0} = \frac{1,2 \cdot 9,81 \cdot 14}{293} = 0,562 \text{ Дж/К.}$$

6.6 Определить, на сколько увеличится энтропия при смешении  $3$  кг азота и  $2$  кг углекислого газа. Газы считать идеальными. Температура, давление газов до смешения одинаковы.

Ответ:  $\Delta S = 0,7725$  кДж/К.

6.7 Холодильная установка холодопроизводительностью  $25140$  кДж/г создает температуру в охлажденном помещении  $t = -10^\circ\text{C}$ . Температура помещения, в котором стоит холодильная установка, работает по обратимому циклу Карно, определить холодильный коэффициент  $\xi$ , количество теплоты  $q'$ , которое передает установка верхнему тепловому источнику (среде) в процессе при  $t = 20^\circ\text{C}$ , и теоретическую мощность привода установки.

Определить, будет нагреваться или охлаждаться помещение после включения холодильной установки, и количество теплоты  $q''$  которое будет подводиться (или отводиться) к воздуху в комнате.

Ответ:  $\xi = 8.77$ ;  $N_{\text{теор}} = 0,794$  кВт;  $q' = 27,98$  МДж/ч;  $q'' = 2,86$  МДж/ч. Помещение будет нагреваться.

6.8 Двигатель расходует на 1 л.с. в час 162 г топлива с теплотой сгорания  $Q_n^p = 10200$  ккал/кг = 42738 кДж/кг.

Определить к.п.д. этого двигателя и сравнить его с к.п.д. цикла Карно, если максимальная температура в процессе горения 1500 °С, температура окружающей среды 20 °С.

Ответ:  $\zeta = 0,383$ ;  $\zeta_k = 0,835$ .

6.9 Рассчитать цикл Карно, для которого  $P_1 = 1$  МПа;  $t_1 = 250$  °С;  $P_3 = 0,12$  МПа;  $t_3 = 30$  °С рисунок 6.1 Рабочее тело -воздух. Рассчитать цикл, это значит найти параметры всех точек (P,V,T), количество подведенного и отведенного тепла, полезное тепло и полезную работу, а также термический к.п.д. цикла.

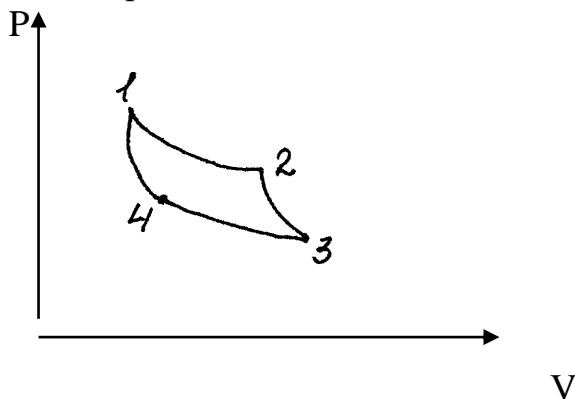


Рисунок 6.1 - Цикл Карно

Ответ:  $V_1 = 0,153$  м<sup>3</sup>/кг;  $V_2 = 0,189$  м<sup>3</sup>/кг;

$V_4 = 0,6$  м<sup>3</sup>/кг;  $q_1 = 32,263$  кДж/кг;  $\zeta_t = 0,42$ ;  $V_3 = 0,739$  м<sup>3</sup>/кг;

$P_2 = 0,8$  МПа;  $P_4 = 0,1$  МПа;  $q_2 = 18,64$  кДж/кг.

6.10 2 кг воздуха совершают цикл Карно в следующих пределах:  $P_1 = 4$  МПа;  $T_1 = 700$  К;  $P_3 = 0,11$  МПа;  $T_3 = 300$  К. Рассчитать цикл.

Ответ:  $V_1 = 0,142$ ;  $V_3 = 3,05$  м<sup>3</sup>;  $P_4 = 0,624$  МПа;  $\zeta_t = 0,415$ .

6.11 Цикл Карно совершается в пределах  $t_1 = 150$ °С и  $t_2 = 5$  °С. Определить использованное и отданное низшему источнику количество тепла, если из верхнего получено  $q_1 = 419$  кДж/кг.  
 Ответ: 143,3 кДж/кг.

6.12 В цикле Карно используется  $q_n = 420$  кДж/кг тепла, причем в низший источник отводится  $q_2 = 167,6$  кДж/кг. Определить термический к.п.д. и верхний предел температур, если низший предел составляет  $T_2 = 300$  К.

Ответ: 0,715; 1050 К.

6.13 Определить эксергию теплоты, которая выделяется при сгорании на воздухе 1 кг топлива теплотой сгорания  $Q_H^p = 20$  МДж/кг. Температура сгорания 1300 °С. Параметры среды:  $P_0 = 0,1$  МПа;  $t_0 = 20$  °С. Теплоемкость продуктов сгорания принять постоянной.

Решение. Получившийся источник теплоты является источником теплоты с переменной температурой, так как в процессе отвода теплоты от источника и превращения теплоты в работу он будет охлаждаться; его работоспособность будет исчерпана, когда его температура станет равной температуре среды. На рисунке 6.2 показан процесс охлаждения источника теплоты линией 1 - 0 до температуры среды  $T_0$ .

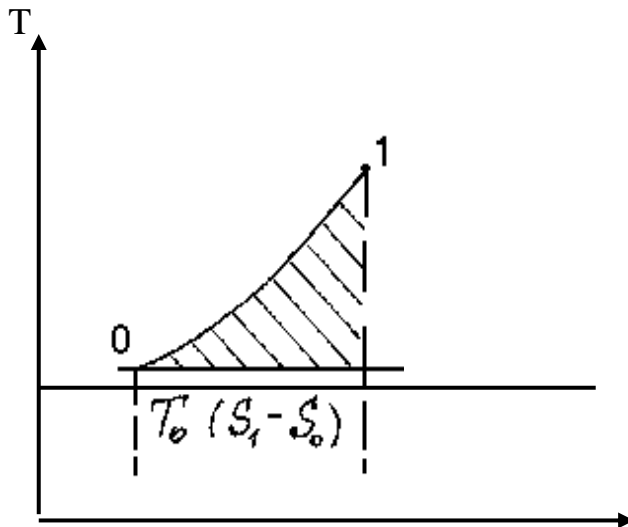


Рисунок 6.2 - Процесс охлаждения

Эксергия будет определяться следующим образом. Для бесконечно малого количества теплоты при температуре  $T$  дифференциал эксергии определяется через термический к.п.д. цикла Карно, т.е.  $d(E_x) = dQ \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right)$ ,

тогда эксергия оказывается равной:

$$E_x = \int \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) \cdot dQ = Q - T_0 \int_0^1 \frac{dQ}{T}; E_x = Q - T_0(S_1 - S_0).$$

На рис. 6.2 эксергия численно равна заштрихованной площади согласно приведенной выше формуле.

Величина  $T_0(S_1 - S_2) = Q_t$  равна тому количеству теплоты, которое надо передать нижнему источнику (среде) в процессе превращения теплоты в

работу. Изменение энтропии может быть вычислено так:  $S_1 - S_0 = C \ln \frac{T_1}{T_0}$

где  $C$  - теплоемкость данного источника теплоты:

$$C = \frac{Q}{T_1 - T_2}.$$

С учетом написанных соотношений эксергия теплоты может быть вычислена по формуле:  $E_x = Q - T_0 \frac{Q}{T_1 - T_0} \ln \frac{T_1}{T_0}$ ;

окончательно  $E_x = Q \left( 1 - \frac{T_0}{T_1 - T_0} \ln \frac{T_1}{T_0} \right).$

Вычислим значение эксергии по этой формуле:

$$E_x = 20,0 \left( 1 - \frac{293,15}{1280} \cdot 2,303 \frac{1573,15}{293,15} \right) = 12,3 \text{ МДж.}$$

Таким образом, эксергия теплоты в данных условиях составляет 61,5 % теплоты сгорания топлива.

6.14 Определить эксергию количества теплоты, которая получается в результате сгорания на воздухе 1 кг топлива с теплотой сгорания  $Q_H^p = 25,0$  МДж/кг; температура сгорания 1500 °С; температура окружающей среды  $t_0 = 20$  °С; теплоемкость продуктов сгорания принять постоянной.

Ответ:  $E_x = 16,08$  МДж/кг, что составляет 64,3 % теплоты сгорания топлива.

## 7 РАСЧЕТ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ГАЗОВОГО ЦИКЛА

### Условие задания

По заданным исходным параметрам рабочего тела для прямого

цикла, образованного заданными процессами, определить:

1. Параметры и функции состояния ( $P, v, T, h, u, s$ ) в крайних точках цикла. Энтальпию и внутреннюю энергию определить относительно состояния  $T_0 = 0$  К, энтропию определить относительно состояния при нормальных условиях ( $T_0 = 273$  К,  $P_0 = 0,101$  ГПа).

2. Построить цикл в  $P, v$ - и  $T, s$ - координатах. Для построения кривых найти промежуточные точки.

3. Для каждого процесса определить работу, количество подведенного и отведенного тепла, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии.

4. Определить работу цикла, количество подведенного и отведенного тепла, термический к.п.д. цикла. Сравнить последний с к.п.д. цикла Карно, имеющего одинаковые с расчетным циклом максимальное и минимальное значение температуры.

Рабочее тело - 1 кг газовой смеси.

Газовая смесь подчиняется уравнению состояния идеального газа.

При расчете теплоемкость считать зависящей от температуры.

Исходные данные для расчета принять в соответствии с номером задания из таблиц 7.1 и 7.2

Таблица 7.1 - Исходные данные для расчета циклов

Предпоследние цифры задания	Исходные данные	Характеристика процессов				
1	2	3				
01	$P_1=0,5 \text{ МПа}; V_2 = 0,09 \text{ м}^3/\text{кг};$ $P_2=1,0 \text{ МПа}; V_3 = 0,14 \text{ м}^3/\text{кг}$	1-2	2-3	3-4	4-1	
02	$P_1=0,1 \text{ МПа}; V_2 = 0,4 \text{ м}^3/\text{кг};$ $P_2=0,2 \text{ МПа}; V_3 = 0,8 \text{ м}^3/\text{кг}$	$T=\text{const}$ $P_2 > P_1$	$P=\text{const}$	$dq=0$	$P=\text{const}$	
03	$P_1=0,3 \text{ МПа}; V_2 = 0,15 \text{ м}^3/\text{кг};$ $P_2=0,6 \text{ МПа}; V_3 = 0,5 \text{ м}^3/\text{кг}$					
04	$t_1=200 \text{ }^\circ\text{C}; P_1=0,6 \text{ МПа}; t_2=300 \text{ }^\circ\text{C}$ $V_3=0,5 \text{ м}^3/\text{кг}; P_5 = 0,3 \text{ МПа}$	1-2	2-3	3-4	4-5	5-1
05	$t_1 = 250 \text{ }^\circ\text{C}; P_1=0,8 \text{ МПа}; t_2=400 \text{ }^\circ\text{C}$ $V_3 = 0,7 \text{ м}^3/\text{кг}; P_5 = 0,2 \text{ МПа}$	$P=\text{const}$ $V_2 > V_1$	$T=\text{const}$	$V=\text{const}$	$P=\text{const}$	$V=\text{const}$
06	$t_1=300 \text{ }^\circ\text{C}; P_1=1,0 \text{ МПа}; t_2=400 \text{ }^\circ\text{C}$ $V_3=0,35 \text{ м}^3/\text{кг}; P_5 = 0,2 \text{ МПа}$					
07	$t_1 = 25 \text{ }^\circ\text{C}; P_1=0,3 \text{ МПа};$ $P_2=2,0 \text{ МПа}; t_3 = 550 \text{ }^\circ\text{C}$	1-2	2-3	3-4	4-1	
08	$t_1 = 25 \text{ }^\circ\text{C}; P_1=0,15 \text{ МПа};$ $P_2=2,0 \text{ МПа}; t_3 = 500 \text{ }^\circ\text{C}$	$dq=0$ $P_2 > P_1$	$P=\text{const}$	$T=\text{const}$	$P=\text{const}$	
09	$t_1 = 30 \text{ }^\circ\text{C}; P_1=0,2 \text{ МПа};$ $P_2=1,5 \text{ МПа}; t_3 = 600 \text{ }^\circ\text{C}$					



1	2	3				
10	$P_1=0,3 \text{ МПа}; V_1=0,3 \text{ м}^3/\text{кг};$ $P_2=1,0 \text{ МПа}; t_3=200 \text{ }^\circ\text{C}$	1-2	2-3	3-4	4-1	
11	$P_1=0,2 \text{ МПа}; V_1 = 0,5 \text{ м}^3/\text{кг};$ $P_2=1,0 \text{ МПа}; t_3 = 400 \text{ }^\circ\text{C}$	$dq=0 \text{ } P_2 > P_1$	$V=\text{const}$	$T=\text{const}$	$P=\text{const}$	
12	$P_1=0,1 \text{ МПа}; V_1 = 0,9 \text{ м}^3/\text{кг};$ $P_2=0,5 \text{ МПа}; t_3 = 1200^\circ\text{C}$					
13	$P_1=1,2 \text{ МПа}; V_1=0,08 \text{ м}^3/\text{кг};$ $P_2=1,4 \text{ МПа}; t_3=160 \text{ }^\circ\text{C}$	1-2	2-3	3-4	4-1	
14	$P_1=0,2 \text{ МПа}; V_1 = 0,6 \text{ м}^3/\text{кг};$ $P_2=0,4 \text{ МПа}; t_3 = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$	$V=\text{const}$ $P_2 > P_1$	$P=\text{const}$	$V=\text{const}$	$P=\text{const}$	
15	$P_1=0,6 \text{ МПа}; V_1=0,15 \text{ м}^3/\text{кг};$ $P_2=0,9 \text{ МПа}; t_3=360 \text{ }^\circ\text{C}$					
16	$V_1 = 0,12 \text{ м}^3/\text{кг}; t_1=50 \text{ }^\circ\text{C};$ $P_2=2,5 \text{ МПа}; t_3=300 \text{ }^\circ\text{C}$	1-2	2-3	3-4	4-1	
17	$V_1 = 0,12 \text{ м}^3/\text{кг}; t_1=100 \text{ }^\circ\text{C};$ $P_2=2,0 \text{ МПа}; t_3=300 \text{ }^\circ\text{C}$	$dq=0 \text{ } P_2 > P_1$	$P=\text{const}$	$T=\text{const}$	$P=\text{const}$	
18	$V_1 = 0,12 \text{ м}^3/\text{кг}; t_1=150 \text{ }^\circ\text{C};$ $P_2=2,5 \text{ МПа}; t_3=850 \text{ }^\circ\text{C}$					
19	$P_1=0,2 \text{ МПа}; P_2=1,0 \text{ МПа};$ $t_2=300 \text{ }^\circ\text{C}; q_{2-3}=1050 \text{ кДж/кг}$	1-2	2-3	3-4	4-1	
20	$P_1=0,1 \text{ МПа}; P_2=0,8 \text{ МПа};$ $t_2= 400 \text{ }^\circ\text{C}; q_{2-3}=500 \text{ кДж/кг}$	$dq=0 \text{ } P_2 > P_1$	$P=\text{const}$	$dq=0$	$P=\text{const}$	
21	$P_1=0,1 \text{ МПа}; P_2= 0,5 \text{ МПа};$ $t_2=300 \text{ }^\circ\text{C}; q_{2-3}=800 \text{ кДж/кг}$					
22	$P_1=0,08 \text{ МПа}; t_1=10 \text{ }^\circ\text{C};$ $V_2= 0,4 \text{ м}^3/\text{кг}; t_3= 227 \text{ }^\circ\text{C}$	1-2	2-3	3-4	4-1	
23	$P_1=0,2 \text{ МПа}; t_1= 100 \text{ }^\circ\text{C};$ $V_2=0,2 \text{ м}^3/\text{кг}; t_3= 400 \text{ }^\circ\text{C}$	$T=\text{const } P_2 > P_1$	$T=\text{const}$	$dq=0$	$V=\text{const}$	
24	$P_1=0,3 \text{ МПа}; t_1= 10 \text{ }^\circ\text{C};$ $V_2=0,1 \text{ м}^3/\text{кг}; t_3=250 \text{ }^\circ\text{C}$					
25	$P_1=0,12 \text{ МПа}; t_1=55 \text{ }^\circ\text{C};$ $E = \frac{V_1}{V_2} = 15; q_{2-3}=920 \text{ кДж/кг}$	1-2	2-3	3-4	4-1	
26	$P_1=0,12 \text{ МПа}; t_1=20^\circ\text{C};$ $E = \frac{V_1}{V_2} = 12; q_{2-3}=500 \text{ кДж/кг}$	$dq=0 \text{ } P_2 > P_1$	$P=\text{const}$	$dq=0$	$V=\text{const}$	

1	2	3				
27	$P_1=0,12 \text{ МПа}; t_1=40 \text{ }^\circ\text{C};$ $E = \frac{V_1}{V_2}=8; q_{2-3}=300 \text{ кДж/кг}$					
28	$V_1=1,1 \text{ м}^3/\text{кг}; t_1=80 \text{ }^\circ\text{C};$ $E = \frac{V_1}{V_2}=14; q_{2-3}=840 \text{ кДж/кг}$	1-2	2-3	3-4	4-1	
29	$V_1=1,1 \text{ м}^3/\text{кг}; t_1=50 \text{ }^\circ\text{C};$ $E = \frac{V_1}{V_2}=16; q_{2-3}=900 \text{ кДж/кг}$	$dq=0 \quad P_2 > P_1$	$P=\text{const}$	$T=\text{const}$	$V=\text{const}$	
30	$V_1=1,1 \text{ м}^3/\text{кг}; t_1=30 \text{ }^\circ\text{C};$ $E = \frac{V_1}{V_2}=12; q_{2-3}=700 \text{ кДж/кг}$					
31	$P_1=0,08 \text{ МПа}; t_1=10 \text{ }^\circ\text{C};$ $V_2=0,4 \text{ м}^3/\text{кг}; t_3=225 \text{ }^\circ\text{C}$	1-2	2-3	3-4	4-1	
32	$P_1=0,12 \text{ МПа}; t_1=30 \text{ }^\circ\text{C};$ $V_2=0,3 \text{ м}^3/\text{кг}; t_3=250 \text{ }^\circ\text{C}$	$T=\text{const} \quad P_2 > P_1$	$V=\text{const}$	$dq=0$	$V=\text{const}$	
33	$P_1=0,2 \text{ МПа}; t_1=50 \text{ }^\circ\text{C};$ $V_2=0,1 \text{ м}^3/\text{кг}; t_3=350 \text{ }^\circ\text{C}$					
34	$V_1=1,2 \text{ м}^3/\text{кг}; t_1=80 \text{ }^\circ\text{C};$ $E = \frac{V_1}{V_2}=5; q_{2-3}=840 \text{ кДж/кг}$	1-2	2-3	3-4	4-1	
35	$V_1=1,2 \text{ м}^3/\text{кг}; t_1=120 \text{ }^\circ\text{C};$ $E = \frac{V_1}{V_2}=6; q_{2-3}=750 \text{ кДж/кг}$	$T=\text{const} \quad P_2 > P_1$	$V=\text{const}$	$T=\text{const}$	$V=\text{const}$	
36	$V_1=1 \text{ м}^3/\text{кг}; t_1=150 \text{ }^\circ\text{C};$ $E = \frac{V_1}{V_2}=9; q_{2-3}=500 \text{ кДж/кг}$					
37	$P_1=3,0 \text{ МПа}; t_1=400 \text{ }^\circ\text{C};$ $P_2=1,4 \text{ МПа}; P_3=0,6 \text{ МПа}$	1-2	2-3	3-4	4-1	
38	$P_1=3,0 \text{ МПа}; t_1=450 \text{ }^\circ\text{C};$ $P_2=2,0 \text{ МПа}; P_3=0,6 \text{ МПа}$	$T=\text{const} \quad P_2 < P_1$	$dq=0$	$T=\text{const}$	$dq=0$	
39	$P_1=3,0 \text{ МПа}; t_1=550 \text{ }^\circ\text{C};$ $P_2=2,0 \text{ МПа}; P_3=0,5 \text{ МПа}$					

1	2	3				
40	$P_1 = 5,0 \text{ МПа}; V_2 = 0,12 \text{ м}^3/\text{кг};$ $P_3 = 0,5 \text{ МПа}; t_4 = -35 \text{ }^\circ\text{C}$	1-2	2-3	3-4	4-1	
41	$P_1 = 6,0 \text{ МПа}; V_2 = 0,14 \text{ м}^3/\text{кг};$ $P_3 = 0,5 \text{ МПа}; t_4 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$	$T = \text{const}$ $P_2 < P_1$	$dq = 0$	$T = \text{const}$	$dq = 0$	
42	$P_1 = 4,0 \text{ МПа}; V_2 = 0,12 \text{ м}^3/\text{кг};$ $P_3 = 0,4 \text{ МПа}; t_4 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$					
43	$P_1 = 0,35 \text{ МПа}; V_1 = 0,25 \text{ м}^3/\text{кг};$ $P_2 = 2,0 \text{ МПа}; t_3 = 300 \text{ }^\circ\text{C}$					
44	$P_1 = 0,25 \text{ МПа}; V_1 = 0,4 \text{ м}^3/\text{кг};$ $P_2 = 1,5 \text{ МПа}; t_3 = 370 \text{ }^\circ\text{C}$	$dq = 0$ $P_2 > P_1$	$P = \text{const}$	$dq = 0$	$V = \text{const}$	
45	$P_1 = 0,4 \text{ МПа}; V_1 = 0,3 \text{ м}^3/\text{кг};$ $P_2 = 2,5 \text{ МПа}; t_3 = 550 \text{ }^\circ\text{C}$					
46	$P_1 = 1,3 \text{ МПа}; t_1 = 300 \text{ }^\circ\text{C};$ $t_3 = 17 \text{ }^\circ\text{C}; P_3 = 0,1 \text{ МПа}$					
47	$P_1 = 1,7 \text{ МПа}; t_1 = 350 \text{ }^\circ\text{C};$ $t_3 = 30 \text{ }^\circ\text{C}; P_3 = 0,12 \text{ МПа}$	$T = \text{const}$ $P_2 < P_1$	$dq = 0$	$T = \text{const}$	$dq = 0$	
48	$P_1 = 1,0 \text{ МПа}; t_1 = 300 \text{ }^\circ\text{C};$ $t_3 = 20 \text{ }^\circ\text{C}; P_3 = 0,5 \text{ МПа}$					
49	$P_1 = 0,2 \text{ МПа}; V_1 = 0,45 \text{ м}^3/\text{кг};$ $P_3 = 1,2 \text{ МПа}; V_2 = 0,14 \text{ м}^3/\text{кг}$					
50	$P_1 = 0,2 \text{ МПа}; V_1 = 0,45 \text{ м}^3/\text{кг};$ $P_3 = 1,5 \text{ МПа}; V_2 = 0,14 \text{ м}^3/\text{кг}$	$dq = 0$ $P_2 > P_1$	$V = \text{const}$	$dq = 0$	$P = \text{const}$	
51	$P_1 = 0,1 \text{ МПа}; V_1 = 0,6 \text{ м}^3/\text{кг};$ $P_3 = 1,0 \text{ МПа}; V_2 = 0,15 \text{ м}^3/\text{кг}$					
52	$P_1 = 3,5 \text{ МПа}; t_1 = 210 \text{ }^\circ\text{C};$ $t_2 = 250 \text{ }^\circ\text{C}; P_3 = 2,5 \text{ МПа}$					
53	$P_1 = 2,0 \text{ МПа}; t_1 = 210 \text{ }^\circ\text{C};$ $t_2 = 250 \text{ }^\circ\text{C}; P_3 = 1,8 \text{ МПа}$	$P = \text{const}$ $P_2 > P_1$	$dq = 0$	$P = \text{const}$	$V = \text{const}$	
54	$P_1 = 1,5 \text{ МПа}; t_1 = 250 \text{ }^\circ\text{C};$ $t_2 = 350 \text{ }^\circ\text{C}; P_3 = 1,0 \text{ МПа}$					

1	2	3				
55	$P_1=0,1 \text{ МПа}; t_1=-50 \text{ }^{\circ}\text{C}; n=1,2;$ $P_2=0,5 \text{ МПа}; \rho=\left(\frac{V_3}{V_2}\right)=2$	1-2	2-3	3-4	4-1	
56	$P_1 = 0,1 \text{ МПа}; t_1=10 \text{ }^{\circ}\text{C}; n=1,2;$ $P_2 = 0,7 \text{ МПа}; \rho=\left(\frac{V_3}{V_2}\right)=2$	$PV^n=\text{const } P_2 > P_1$	$P=\text{const}$	$PV^n=\text{const}$	$P=\text{const}$	
57	$P_1=0,12 \text{ МПа}; t_1=30 \text{ }^{\circ}\text{C}; n=1,25;$ $P_2 = 1,0 \text{ МПа}; \rho=\left(\frac{V_3}{V_2}\right)=1,8$					
58	$P_1 = 0,12 \text{ МПа}; V_1 = 0,5 \text{ м}^3/\text{кг};$ $t_2=130 \text{ }^{\circ}\text{C}; P_3=4,0 \text{ МПа}$					
59	$P_1 = 0,1 \text{ МПа}; V_1 = 0,7 \text{ м}^3/\text{кг};$ $t_2= 150 \text{ }^{\circ}\text{C}; P_3 = 4,0 \text{ МПа}$	$dq=0 \text{ } P_2 > P_1$	$V=\text{const}$	$dq=0$	$P=\text{const}$	
60	$P_1 = 0,08 \text{ МПа}; V_1 = 0,75 \text{ м}^3/\text{кг};$ $t_1=150 \text{ }^{\circ}\text{C}; P_3 = 4,5 \text{ МПа}$					
61	$P_1 = 0,18 \text{ МПа}; t_2= 300 \text{ }^{\circ}\text{C};$ $V_2 = 0,5 \text{ м}^3/\text{кг}; P_3 = 0,25 \text{ МПа}$	1-2	2-3	3-4	4-1	
62	$P_1 = 0,2 \text{ МПа}; t_2= 350 \text{ }^{\circ}\text{C};$ $V_2=0,2 \text{ м}^3/\text{кг}; P_3 = 0,7 \text{ МПа}$	$PV^{1,2}=\text{const}$ $P_2 > P_1$	$T=\text{const}$	$PV^{1,2}=\text{const}$	$V=\text{const}$	
63	$P_1 = 0,15 \text{ МПа}; t_2= 300 \text{ }^{\circ}\text{C};$ $V_2 = 0,6 \text{ м}^3/\text{кг}; P_3 = 0,23 \text{ МПа}$					
64	$P_1 = 0,1 \text{ МПа}; t_1= 50 \text{ }^{\circ}\text{C};$ $P_2 = 1,0 \text{ МПа}; t_3= 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T=\text{const } P_2 > P_1$	$P=\text{const}$	$T=\text{const}$	$P=\text{const}$	
65	$P_1 = 0,1 \text{ МПа}; t_1= 20 \text{ }^{\circ}\text{C};$ $P_2 = 1,2 \text{ МПа}; t_3 = 250 \text{ }^{\circ}\text{C}$					
66	$P_1 = 0,2 \text{ МПа}; t_1 = 50 \text{ }^{\circ}\text{C};$ $P_2 = 0,8 \text{ МПа}; t_3 = 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$					
67	$P_1 = 0,1 \text{ МПа}; T_1 = 300 \text{ K.}$ $E=\left(\frac{V_1}{V_2}\right)=16; \rho=\left(\frac{V_3}{V_2}\right)=4$	1-2	2-3	3-4	4-1	
68	$P_1 = 0,1 \text{ МПа}; T_1 = 320 \text{ K.}$ $E=\left(\frac{V_1}{V_2}\right)=14; \rho=\left(\frac{V_3}{V_2}\right)=3$	$dq=0 \text{ } P_2 > P_1$	$T=\text{const}$	$dq=0$	$V=\text{const}$	
69	$P_1= 0,2 \text{ МПа}; T_1 = 300 \text{ K};$ $E=\left(\frac{V_1}{V_2}\right)=15; \rho=\left(\frac{V_3}{V_2}\right)=2$					

1	2	3				
70	$P_1 = 0,1 \text{ МПа}; t_1 = 27 \text{ }^\circ\text{C};$ $P_2 = 0,8 \text{ МПа}; q_{2-3} = 620 \text{ кДж/кг}$	1-2	2-3	3-4	4-1	
71	$P_1 = 0,2 \text{ МПа}; t_1 = 50 \text{ }^\circ\text{C};$ $P_2 = 1,0 \text{ МПа}; q_{2-3} = 600 \text{ кДж/кг}$	$T = \text{const}$ $P_2 > P_1$	$V = \text{const}$	$T = \text{const}$	$V = \text{const}$	
72	$P_1 = 0,3 \text{ МПа}; t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C};$ $P_2 = 1,5 \text{ МПа}; q_{2-3} = 700 \text{ кДж/кг}$					
73	$P_1 = 1,2 \text{ МПа}; t_1 = 100 \text{ }^\circ\text{C};$ $P_2 = 3,0 \text{ МПа}; t_3 = 200 \text{ }^\circ\text{C}$	1-2	2-3	3-4	4-1	
74	$P_1 = 0,2 \text{ МПа}; t_1 = 100 \text{ }^\circ\text{C};$ $P_2 = 1,0 \text{ МПа}; t_3 = 200 \text{ }^\circ\text{C}$	$T = \text{const}$ $P_2 > P_1$	$P = \text{const}$	$T = \text{const}$	$P = \text{const}$	
75	$P_1 = 0,6 \text{ МПа}; t_1 = 150 \text{ }^\circ\text{C};$ $P_2 = 1,5 \text{ МПа}; t_3 = 250 \text{ }^\circ\text{C}$					
76	$P_1 = 5,0 \text{ МПа}; t_1 = 300 \text{ }^\circ\text{C};$ $P_2 = 1,8 \text{ МПа}; V_3 = 0,1 \text{ м}^3/\text{кг}$	1-2	2-3	3-4	4-1	
77	$P_1 = 2,5 \text{ МПа}; t_1 = 300 \text{ }^\circ\text{C};$ $P_2 = 1,25 \text{ МПа}; V_3 = 0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$	$dq = 0$ $P_2 > P_1$	$T = \text{const}$	$dq = 0$	$V = \text{const}$	
78	$P_1 = 1,0 \text{ МПа}; t_1 = 300 \text{ }^\circ\text{C};$ $P_2 = 0,5 \text{ МПа}; V_3 = 0,4 \text{ м}^3/\text{кг}$					
79	$P_1 = 2,4 \text{ МПа}; V_1 = 0,04 \text{ м}^3/\text{кг};$ $P_2 = 2,8 \text{ МПа}; t_3 = 150 \text{ }^\circ\text{C}$	1-2	2-3	3-4	4-1	
80	$P_1 = 1,5 \text{ МПа}; V_1 = 0,08 \text{ м}^3/\text{кг};$ $P_2 = 1,9 \text{ МПа}; t_3 = 300 \text{ }^\circ\text{C}$	$V = \text{const}$ $P_2 > P_1$	$P = \text{const}$	$V = \text{const}$	$P = \text{const}$	
81	$P_1 = 1,0 \text{ МПа}; V_1 = 0,12 \text{ м}^3/\text{кг};$ $P_2 = 1,5 \text{ МПа}; t_3 = 700 \text{ }^\circ\text{C}$					
82	$t_1 = 210 \text{ }^\circ\text{C}; P_1 = 1,0 \text{ МПа}; t_2 = 300 \text{ }^\circ\text{C};$ $V_3 = 0,2 \text{ м}^3/\text{кг}; P_4 = 0,6 \text{ МПа}$	1-2	2-3	3-4	4-5	5-1
83	$t_1 = 200 \text{ }^\circ\text{C}; P_1 = 1,5 \text{ МПа}; t_2 = 300 \text{ }^\circ\text{C};$ $V_3 = 0,2 \text{ м}^3/\text{кг}; P_4 = 0,4 \text{ МПа}$	$P = \text{const}$ $V_2 > V_1$	$dq = 0$	$V = \text{const}$	$P = \text{const}$	$V = \text{const}$
84	$t_1 = 200 \text{ }^\circ\text{C}; P_1 = 2,0 \text{ МПа}; t_2 = 300 \text{ }^\circ\text{C};$ $V_3 = 0,2 \text{ м}^3/\text{кг}; P_4 = 0,5 \text{ МПа}$					
85	$V_1 = 0,12 \text{ м}^3/\text{кг}; P_1 = 0,8 \text{ МПа};$ $P_2 = 2,0 \text{ МПа}; P_3 = 1,2 \text{ МПа}$	1-2	2-3	3-4	4-1	
86	$V_1 = 0,15 \text{ м}^3/\text{кг}; P_1 = 0,7 \text{ МПа};$ $P_2 = 2,5 \text{ МПа}; P_3 = 2,0 \text{ МПа}$	$dq = 0$ $P_2 > P_1$	$T = \text{const}$	$dq = 0$	$V = \text{const}$	
87	$V_1 = 0,8 \text{ м}^3/\text{кг}; P_1 = 1,0 \text{ МПа};$ $P_2 = 3,0 \text{ МПа}; P_3 = 2,5 \text{ МПа}$					

Окончание таблицы 7.1

1	2	3				
88	$t_3 = 27\text{ }^{\circ}\text{C}; P_3 = 0,1\text{ МПа};$ $V_3/V_2 = 3; q_{1-2} = 220\text{ кДж/кг}$	1-2	2-3	3-4	4-1	
89	$t_3 = 50\text{ }^{\circ}\text{C}; P_3 = 0,13\text{ МПа};$ $V_3/V_2 = 4; q_{1-2} = 300\text{ кДж/кг}$	$T = \text{const } P_2 > P_1$	$dq = 0$	$T = \text{const}$	$dq = 0$	
90	$t_3 = 50\text{ }^{\circ}\text{C}; P_3 = 0,08\text{ МПа};$ $V_3/V_2 = 5; q_{1-2} = 300\text{ кДж/кг}$					
91	$P_1 = 0,1\text{ МПа}; t_1 = 20\text{ }^{\circ}\text{C};$ $E = (V_1/V_2) = 6; \lambda = (P_3/P_2) = 2$	1-2	2-3	3-4	4-1	
92	$P_1 = 0,12\text{ МПа}; t_1 = 40\text{ }^{\circ}\text{C};$ $E = (V_1/V_2) = 8; \lambda = (P_3/P_2) = 1,5$	$dq = 0 P_2 > P_1$	$V = \text{const}$	$dq = 0$	$V = \text{const}$	
93	$P_1 = 0,12\text{ МПа}; t_1 = 20\text{ }^{\circ}\text{C};$ $E = (V_1/V_2) = 10; \lambda = (P_3/P_2) = 1,8$					
94	$P_1 = 0,1\text{ МПа}; t_1 = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ $E = (V_1/V_2) = 5; q_{2-3} = 500\text{ кДж/кг}$	1-2	2-3	3-4	4-1	
95	$P_1 = 0,13\text{ МПа}; t_1 = 40\text{ }^{\circ}\text{C};$ $E = (V_1/V_2) = 7; q_{2-3} = 300\text{ кДж/кг}$	$dq = 0 P_2 > P_1$	$V = \text{const}$	$T = \text{const}$	$V = \text{const}$	
96	$P_1 = 0,11\text{ МПа}; t_1 = 50\text{ }^{\circ}\text{C};$ $E = (V_1/V_2) = 10; q_{2-3} = 600\text{ кДж/кг}$					
97	$P_1 = 0,1\text{ МПа}; t_1 = 15\text{ }^{\circ}\text{C};$ $E = (V_1/V_2) = 16; q_{2-3} = 600\text{ кДж/кг}$	1-2	2-3	3-4	4-1	
98	$P_1 = 0,11\text{ МПа}; t_1 = 15\text{ }^{\circ}\text{C};$ $E = (V_1/V_2) = 14; q_{2-1} = 800\text{ кДж/кг}$	$dq = 0 P_2 > P_1$	$P = \text{const}$	$T = \text{const}$	$V = \text{const}$	
99	$P_1 = 0,12\text{ МПа}; t_1 = 25\text{ }^{\circ}\text{C};$ $E = (V_1/V_2) = 18; q_{2-3} = 750\text{ кДж/кг}$					

Последняя цифра задания	(1)	(2)				
		CO <sub>2</sub>	CO	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	O <sub>2</sub>
0	Объёмны й -“- -“- -“- -“-	10	-	50	11	29
1		10	2	80	-	8
2		13	-	75	6	6
3		14	-	77	5	4
4		15	-	75	4	6
5	-“-	15	-	75	5	5
6	Весовой -“- -“- -“- -“-	14	-	76	6	4
7		10	-	75	5	10
8		17	-	74	5	4
9		10	-	80	5	5

Таблица 7.3 – Параметры состояния в основных точках цикла

Точки	Параметры	P	V	T	t	U	h	S
		МПа	м <sup>3</sup> /кг	К	°С	кДж/кг	кДж/кг	кДж/кг К
1.								
2.								
3.								
4.								

Процессы	Параметры	l	$\Delta U$	$\Delta h$	q	$\Delta S$
		кДж/кг	кДж/кг	кДж/кг	кДж/кг	кДж/кг
1-2						
2-3						
3-4						
4-1						
Сумма						

Объем выполняемой расчетно-графической работы может быть расширен за счет изменения одного из исходных параметров. В этом случае расчет можно выполнить с помощью ЭВМ. По результатам расчета дополнительно строятся зависимости от переменного параметра максимального давления, максимальной температуры, термического КПД и работы цикла.

Дополнительные изменения исходного параметра для некоторых вариантов приводятся в таблице 7.5.

Таблица 7.5 – Исходные данные для расширенного варианта расчета

№ варианта	Исходный параметр	Изменение исходного параметра				
		1	2	3	4	5
07	$t_3, ^\circ\text{C}$	500	600	700	800	900
10	$t_3, ^\circ\text{C}$	200	300	400	500	600
19	$q_{2-3}, \text{кДж/кг}$	800	900	1000	1100	1200
25	$\varepsilon$	15	16	17	18	19
28	$\varepsilon$	14	16	18	20	22
31	$t_3, ^\circ\text{C}$	300	400	500	600	700
34	$\varepsilon$	5	6	7	8	9
50	$P_3, \text{МПа}$	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
55	$n$	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
56	$\rho$	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
67	$\varepsilon$	16	17	18	19	20
68	$\rho$	1,25	1,5	2,0	2,5	3,0
70	$q_{2-3}, \text{кДж/кг}$	500	600	700	800	900
71	$P_2, \text{МПа}$	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
73	$t_3, ^\circ\text{C}$	300	400	500	600	700
91	$\varepsilon$	6	7	8	9	10
92	$\lambda$	1,2	1,4	1,6	1,8	2
94	$q_{2-3}, \text{кДж/кг}$	300	400	500	600	700
95	$\varepsilon$	6	7	8	9	10
97	$\varepsilon$	12	14	16	18	20
99	$q_{2-3}, \text{кДж/кг}$	500	600	700	800	900

При подготовке к выполнению задания и его защите обратить внимание на вопросы:

1. Первый закон термодинамики. Работа расширения. Внутренняя энергия. Энтальпия.  $P, v$  – координаты.
2. Термодинамические процессы. Обратимый и необратимый процессы. Изобарический, изохорический, изотермический, адиабатический и политропный процессы идеального газа.



3. Второй закон термодинамики. Прямой и обратный термодинамические циклы. Обратимые и необратимые циклы. Цикл Карно. Энтропия.  $T, s$  – координаты.

4. Циклы ДВС, ГТУ и реактивных двигателей.

## 8 РАСЧЕТ РАБОТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ПОРШНЕВОГО КОМПРЕССОРА

### Условие задания

Дано: поршневой двухступенчатый компрессор производительностью  $G$ , кг/ч ( $\text{л}, \text{м}^3/\text{ч}$ ) засасывает атмосферный воздух при  $t_1, ^\circ\text{C}$  и давлении  $P_1$  и сжимает его до давления  $P_3$ .

Определить:

1. Теоретическую (без учета потерь и влияния вредного пространства цилиндра) мощность, потребляемую компрессором, если сжатие воздуха происходит:

- а) изотермически;
- б) адиабатически;
- в) по политропе с показателем политропы  $n$ .

Провести сравнение результатов расчета при различных процессах сжатия.

2. Количество тепла, отведенное от цилиндров и холодильника компрессора охлаждающей водой, и расход воды, если при охлаждении компрессора вода нагревается до  $15 ^\circ\text{C}$ .

При расчете принять для воздуха:

$$R = 0,287 \text{ кДж/кг}\cdot\text{K}; \quad C_p = 1,006 \text{ кДж/кг}\cdot\text{K}.$$

Построить диаграмму работы компрессора в  $P, \text{л}$  - и  $T, s$  - координатах.

Производительность компрессора и начальные параметры воздуха принять по первой цифре номера задания из таблицы 8.1.

Таблица 8.1 – Производительность компрессора и начальные параметры воздуха

Первая цифра номера задания	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$G$ , кг/ч	100	200	300	400	-	-	-	-	-	-
$P_1$ , МПа	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
$Y$ , $\text{м}^3/\text{ч}$	-	-	-	-	80	120	200	250	600	1000
$t_1, ^\circ\text{C}$	10	15	20	25	30	10	15	20	25	30

Конечное давление и показатель политропы принять согласно последней цифре номера задания из таблицы 8.2.

Таблица 8.2 – Конечное давление и показатель политропы

Последняя цифра номера задания	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_3$ , МПа	2,0	1,5	2,5	4,0	2,0	3,5	1,8	4,4	5,0	5,0
$n$	1,3	1,3	1,2	1,25	1,2	1,15	1,3	1,3	1,3	1,26

Примечание. Построение диаграммы в  $P, V$  - и  $T, s$  - координатах выполнить в масштабе на миллиметровой бумаге форматом 203×288 мм. Кривые строить по промежуточным точкам. Энтропию определить относительно состояния при нормальных условиях ( $T_0 = 273$  К,  $P_0 = 0,101$  ГПа ).

Результаты расчета свести в таблицу 8.3.

Таблица 8.3 – Результаты расчета

Процессы сжатия	Затрачиваемая работа и теоретическая мощность		Отводимое тепло при охлаждении газа			Общий расход охлаждающей воды $G_6$ , кг/с
	$\alpha_0$ , кДж	$N_0$ , кВт	от цилиндров, кДж/с	в холо – дильнике, кДж/с	всего, кДж/с	
Изотермический						
Адиабатический						
Политропный						

При выполнении задания и подготовке его к защите необходимо обратить внимание на следующие вопросы:

1. Виды компрессоров.
2. Одноступенчатый поршневой компрессор.
3. Работа, затрачиваемая компрессором. Зависимость работы от процесса сжатия.
4. Влияние на работу компрессора вредного пространства цилиндра.
5. Необходимость охлаждения компрессора.

## 9 ВОДЯНОЙ ПАР

### 9.1 Общие положения

На рисунке 9.1 дана диаграмма  $P, v$  для водяного пара. Линии I соответствует вода при  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , кривой X – вода при температуре кипения и кривой III – сухой насыщенный пар.

Кривая X называется нижней пограничной или нижней предельной кривой, кривая III – верхней пограничной или верхней предельной кривой.

Точку пересечения пограничных кривых называют критической.

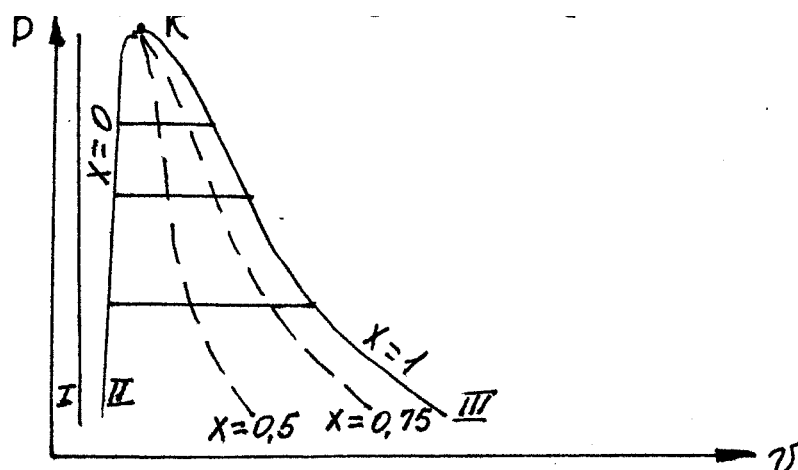


Рисунок 9.1 –  $P, v$  - диаграмма водяного пара

Она характеризует критическое состояние, при котором исчезает различие в свойствах пара и жидкости. Критическая температура является наивысшей температурой жидкости и ее насыщенного пара. При температурах выше критической возможно существование только перегретого пара. Впервые мысль о критической температуре была высказана знаменитым русским ученым Д.И.Менделеевым, назвавшем ее «абсолютной температурой кипения».

Критические параметры для водяного пара следующие:

$$t_k = 374,15\text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$P_k = 225,65\text{ кг/см}^2 = 22,2\text{ МПа};$$

$$v_k = 0,0034\text{ м}^3/\text{кг}.$$

Температура кипения жидкости одновременно является температурой ее насыщенного пара при данном давлении. Каждому давлению соответствует вполне определенная температура кипения жидкости, а следовательно, и ее насыщенного пара. Если давление пара обозначить через  $P$ , МПа, а температуру насыщенного пара через  $t_n$ , то

$$P = f(t_n).$$

Значения  $P$  и  $t_n$  даны в таблицах насыщенного пара ( приложение Б ). В этих же таблицах даны значения других важнейших параметров: удельного

объема кипящей жидкости  $v'$ , удельного объема сухого насыщенного пара  $v''$ , удельного веса сухого насыщенного пара  $\rho''$ , энтальпия кипящей жидкости  $h'$ , энтальпия сухого насыщенного пара  $h''$ , энтропия жидкости  $S'$  и сухого насыщенного пара  $S''$ .

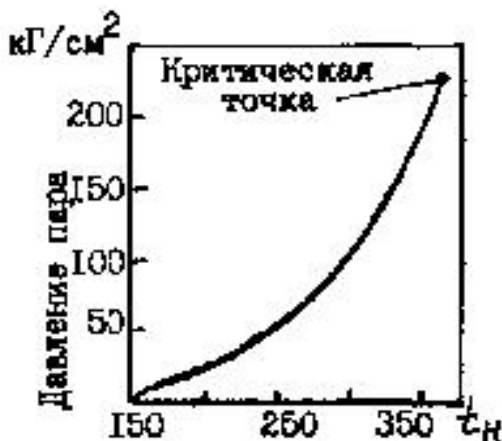
Таблицы водяного пара составлялись различными исследователями. Первые отечественные таблицы водяного пара были составлены на основе теоретических исследований советским ученым М.П.Вукаловичем.

В 1952 г. Всесоюзным теплотехническим институтом (ВТИ) были опубликованы новые таблицы водяного пара, основанные на экспериментальных данных.

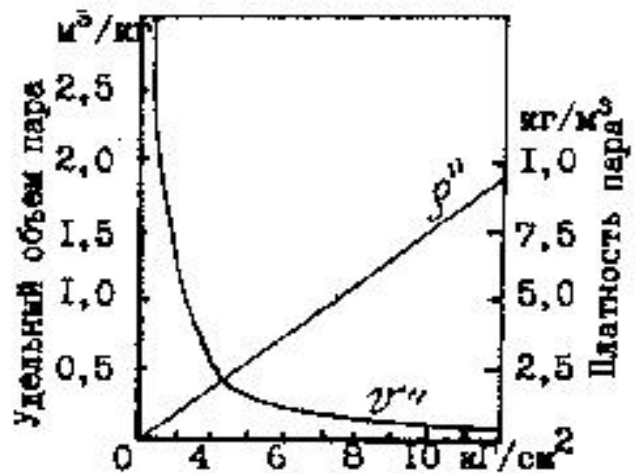
Таблицы водяного пара Вукаловича и ВТИ не имеют существенных различий, являются наиболее точными по сравнению со всеми вышедшими ранее, и ими следует пользоваться для практических расчетов.

### СУХОЙ НАСЫЩЕННЫЙ ПАР

Состояние сухого насыщенного пара определяется его давлением или температурой. Таблица приложения В дает возможность определить давление пара ( и все остальные его параметры ) по температуре, а таблица приложения Б – температуру пара ( и все остальные его параметры ) по давлению. Зависимость  $P = f(t_n)$ ,  $v'' = f(p)$  и  $\rho'' = f(p)$  для водяного пара приведены на рисунках 9.2 и 9.3.



Температура пара  
Рисунок 9.2 – Зависимость температуры кипения от давления



Давление пара  
Рисунок 9.3 – Зависимость удельного объема и плотности пара от давления

## ВЛАЖНЫЙ НАСЫЩЕННЫЙ ПАР

Состояние влажного насыщенного пара определяется его давлением или температурой и парасодержанием или степенью сухости пара  $X$ . Очевидно, значение  $X = 0$  соответствует начальному моменту парообразования, а  $X = 1$  – концу парообразования, т.е. сухому насыщенному пару.

Температура влажного пара есть функция только давления и определяется так же, как температура сухого пара. Удельный объем влажного пара зависит от давления и степени сухости и определяется из следующего уравнения:

$$v_x = v'' \cdot x + (1-x) v'. \quad (9.1)$$

Из этой формулы получается значение  $X$ :

$$X = \frac{v_x - v'}{v'' - v'}. \quad (9.2)$$

Для давлений до 30 ата и  $X \geq 0,8$  можно пренебречь последним членом равенства (9.1). Тогда удельный объем влажного насыщенного пара будет равен:

$$v_x = v'' \cdot X. \quad (9.3)$$

Для больших давлений и малых  $X$  следует пользоваться формулой (9.1). Плотность влажного пара определяется из равенства:

$$\rho_x = \frac{1}{v_x} = \frac{1}{v'' \cdot x + (1-x)v'} \quad (9.4)$$

или приближенно

$$\rho_x = \frac{1}{v''_X} = \frac{\rho''}{X}. \quad (9.5)$$

## ПЕРЕГРЕТЫЙ ПАР

Перегретый пар имеет более высокую температуру  $t$  по сравнению с температурой  $t_n$  сухого насыщенного пара того же давления. Следовательно, в отличие от насыщенного пара перегретый пар определенного давления может иметь различные температуры. Для характеристики состояния перегретого пара необходимо знать два его параметра, например, давление и температуру. Разность температур перегретого и насыщенного пара того же давления  $t - t_n$  называют перегревом пара.

Весьма важным в теплотехнических расчетах является определение количества, затрачиваемого на отдельные стадии процесса парообразования и изменения внутренней энергии.

Количество тепла, затраченное для подогрева жидкости от  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  до температуры кипения при постоянном давлении, называется теплотой жидкости. Её можно определить как разность энтальпий жидкости в состоянии кипения и жидкости при том же давлении и  $t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , т.е.

$$q_p = h_2 - h_1 = h'_o - h_o'',$$

а так как  $h_o''$  при невысоких давлениях с достаточной для технических расчетов точностью можно считать равной нулю, то

$$q_p = h'.$$

Значения внутренней энергии жидкости можно вычислить из общей зависимости  $h = U + Pv$ . Тогда

$$U' = h' - pv',$$

а так как величина  $Pv'$  мала, то при невысоких давлениях можно принимать, что

$$U' = h',$$

т.е. внутренняя энергия жидкости равна энтальпии жидкости. Значение  $h'$ , а следовательно, и  $U'$  приводятся в таблицах насыщенного пара.

Количество тепла, необходимое для перевода 1 кг кипящей жидкости в сухой насыщенный пар при постоянном давлении, называют теплотой парообразования и обозначают буквой  $r$ . Это количество теплоты расходуется на изменение внутренней энергии, связанное с преодолением сил сцепления между молекулами жидкости ( $\rho$  кДж/кг) и на работу расширения ( $\Psi$  кДж/кг).

Величину  $\rho$  называют внутренней теплотой парообразования, а величину  $\Psi$  - внешней теплотой парообразования. Очевидно, что

$$\Psi = P (v'' - v'), \text{ кДж}$$

и

$$r = \rho + \Psi \quad (9.6)$$

Значения  $r$  приводятся в таблицах насыщенного пара.

Энтальпия сухого насыщенного пара ( $h''$ ) определяется по формуле

$$h'' = h' + r, \quad (9.7)$$

а изменение внутренней энергии при получении сухого насыщенного пара из 1 кг жидкости при 0 °С – из выражения:

$$U'' = h'' - p v'' \quad (9.8)$$

Для влажного насыщенного пара имеем следующие соотношения:

$$h_x = h' + r x \quad (9.9)$$

и

$$U_x = h_x - p v_x, \quad (9.10)$$

где  $h_x$  – энтальпия влажного насыщенного пара;

$U_x$  – внутренняя энергия влажного насыщенного пара.

Количество тепла, необходимое для перевода 1 кг сухого насыщенного пара в перегретый при постоянном давлении, называется теплотой перегрева. Очевидно, что

$$q_{\text{п}} = \int_{t_{\text{н}}}^t C_p dT \quad (9.11)$$

где  $C_p$  – истинная весовая теплоемкость перегретого пара при постоянном давлении.

В результате тщательных исследований установлено, что теплоемкости  $C_p$  перегретых паров зависят от температуры и давления, а также найдена аналитическая зависимость

$$C_p = f(p, t). \quad (9.12)$$

Однако пользоваться этой зависимостью вследствие ее сложности и громоздкости неудобно. Расчеты существенно упрощаются тем, что в таблицах водяного пара приводятся значения энтальпии перегретого пара. Поэтому теплота перегрева может быть найдена из выражения

$$q_{\text{п}} = h - h'' \quad (9.13)$$

### ЭНТРОПИЯ ПАРА

Энтропия водяного пара отсчитывается от условного нуля, за каковой принимают энтропию воды при 0°С и при давлении насыщения, соответствующем этой температуре, т.е. при давлении 0,0062 ата.

Энтропия жидкости определяется из выражения

$$S' = C \ln \frac{T_{\text{н}}}{273}, \quad (9.14)$$

где  $C$  – теплоемкость воды,  $T_{\text{н}}$  – температура кипения жидкости в °К.

Энтропия сухого насыщенного пара  $S''$  определяется из уравнения

$$S'' = S' + \frac{r}{T_H}, \quad (9.15)$$

где  $r$  – теплота парообразования.

Энтропия влажного насыщенного пара  $S_x$  равна

$$S_x = S' + \frac{r}{T_H} \cdot x \quad (9.16)$$

или на основании формулы (7.15)

$$S_x = S' + (S'' - S') \cdot x, \quad (9.17)$$

где  $x$  – степень сухости пара.

Значения энтропии  $S'$  и  $S''$  приведены в приложениях Б и В.

Значения  $\frac{r}{T_H}$  можно получить из этих таблиц как разность  $S'' - S'$ .

Энтропия перегретого пара может быть найдена из уравнения

$$S = S'' + \int_{T_H}^T C_p \frac{dT}{T}. \quad (9.18)$$

Значения  $S$  приводятся в таблицах перегретого пара.

При определении состояния пара заданных параметров необходимо исходить из следующего.

Для перегретого и сухого насыщенного пара одинакового давления

$$v > v'' \text{ и } t > t_H;$$

при одной и той же температуре перегретого и сухого насыщенного пара

$$v > v'' \text{ и } p < p_H.$$

При помощи водяного пара и этих соотношений легко определить состояние пара.

Таблица 9.2 – Формулы для расчета теплоты и работы в процессах водяного пара

Процесс	Теплота	Работа
Изохорический	$q = U_2 - U_1$ $q = (h_2 - h_1) - v (P_2 - P_1)$	$\iota = 0$
Изобарический	$q = U_2 - U_1 + P(v_2 - v_1)$ $q = h_2 - h_1$	$\iota = q - \Delta U$
Изотермический	$q = T (S_2 - S_1)$	$\iota = q - \Delta U$
Адиабатический	$q = 0$	$\iota = U_2 - U_1$ $\iota = (h_1 - P_1 v_1) - (h_2 - P_2 v_2)$
$X = \text{const}$	$q = \frac{T_1 - T_2}{2} \cdot \Delta S_{12}$	$\iota = q - \Delta U$



## ЗАДАЧИ

9.1 Сухой насыщенный пар имеет давление 10,2 МПа. Определить все остальные параметры пара.

Решение. По таблицам [6] находим:  $t_n = 312,42 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;  $S'' = 5,6019 \text{ кДж/кг}$ ;  $v'' = 0,01756 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $\rho'' = 59,648 \text{ кг/м}^3$ ;  $h'' = 2720,8 \text{ кДж/кг}$ ;  $r = 1303,5 \text{ кДж/кг}$ ;

$$U'' = h'' - Pv'' = 2720,8 - 10,2 \cdot 0,01756 = 929,68 \text{ кДж/кг}.$$

9.2 Определить состояние водяного пара, если температура его  $300^\circ\text{C}$ , а давление 6,0 МПа.

9.3 Определить состояние водяного пара, если его давление 4,5 МПа, а удельный объем  $0,0707 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

9.4 Состояние водяного пара характеризуется давлением 9 МПа и влажностью 20%. Найти удельный объем, внутреннюю энергию, энтропию и энтальпию пара.

Решение. При  $P = 9 \text{ МПа}$   $v' = 0,0014179 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $v'' = 0,02046 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $h' = 1363,2 \text{ кДж}$ ;  $h'' = 2741,8 \text{ кДж/кг}$ ;  $S' = 3,2875 \text{ кДж/кг}\cdot\text{K}$ ;  $S'' = 5,6773 \text{ кДж/кг}\cdot\text{K}$ ;  $r = 1377,6 \text{ кДж/кг}$ ;  $v'_x = v' + x(v'' - v') = 0,0014179 + 0,8(0,02046 - 0,0014179) = 0,016645 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;

$$h_x = h' + x(h'' - h') = h' + rx = 1364,2 + 0,8 \cdot 1377,6 = 2466,3 \text{ кДж/кг};$$

$$U_x = h_x - Pv_x = 2466,8 - 9 \cdot 10^3 \cdot 0,016645 = 2317,0 \text{ кДж/кг}.$$

9.5 Вода нагрета до  $150,96 \text{ } ^\circ\text{C}$  (при давлении 1,2 МПа). На сколько градусов еще нагреть воду, чтобы началось кипение?

9.6 Определить состояние водяного пара, если его температура  $363,37 \text{ } ^\circ\text{C}$ , а давление 2,0 МПа.

Решение. При давлении 2,0 МПа температура насыщения пара  $212,37 \text{ } ^\circ\text{C}$ , следовательно, пар перегрет; перегрев составляет  $363,37 - 212,37 = 151 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

9.7 Определить состояние водяного пара, если его давление 7,5 МПа, а удельный объем  $0,019 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

9.8 В верхней половине барабана парового котла находится сухой насыщенный пар, а в нижней вода в состоянии насыщения. Во сколько раз масса воды больше массы пара, если давление пара в барабане  $P = 11,5 \text{ МПа}$ ?

9.9 Состояние водяного пара определяется давлением 14 МПа и температурой 813 К. Найти значения остальных параметров состояния по таблицам приложения Б и В.

9.10 Внутри трубы под давлением 11 МПа происходит парообразование за счет теплового потока 75 кВт, подводимого от внешних источников. Вода в трубу поступает при температуре насыщения;

расход 0,5 кг/с. Определить плотность пароводяной смеси на выходе из трубы.

Решение. Количество образующегося пара

$$G = \frac{Q}{r} = 75/1254,2 = 0,059 \text{ кг/с.}$$

Степень сухости пара на выходе

$$X = 0,0598/0,5 = 0,1196.$$

Удельный объем смеси

$$\begin{aligned} v_x &= v'' X + (1 - X)v' = 0,01597 \cdot 0,1196 + (1 - 0,1196) \cdot 0,1489 \cdot 10^{-2} = \\ &= 0,3221 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{кг}. \end{aligned}$$

Плотность пароводяной смеси на выходе из трубы

$$\rho_x = \frac{1}{v_x} = 1/(0,3221 \cdot 10^{-2}) = 310,6 \text{ кг/м}^3.$$

9.11 Пользуясь  $h,s$ - диаграммой, определить параметры состояния водяного пара, если: а) температура пара 100 °С, а удельный объем 1,4 м<sup>3</sup>/кг; б) давление пара 0,2 МПа, а температура 250 °С; в) температура пара 170 °С; г) энтальпия пара составляет 2410 кДж/кг, а давление – 0,02 МПа; д) энтропия пара равна 8 кДж/кг·К, его температура 430 °С.

9.12 Перегретый пар массой 2 кг занимает объем 1,0 м<sup>3</sup>/кг. Пользуясь  $h,s$ - диаграммой, найти давление пара, если его температура равна 490 °С.

9.13 Сухой насыщенный пар массой 16 кг занимает объем, равный 4 м<sup>3</sup>. Найти температуру и давление насыщения.

9.14 Определить теплоту, необходимую для перегрева 1кг пара в пароперегревателе котла, если давление в нем постоянно и равно 14 МПа, а температура перегрева 540 °С.

9.15. Решить предыдущую задачу для случая, когда на входе в пароперегреватель влажность пара составляет 3 %.

9.16 Сухой насыщенный пар объемом 1,5 м<sup>3</sup> при давлении в 1 МПа подогревается так, что давление в конце процесса увеличивается вдвое при неизменном объеме. Найти количество теплоты, затраченное на нагревание.

9.17. Найти теплоту парообразования, если давление  $P = 5$  МПа.

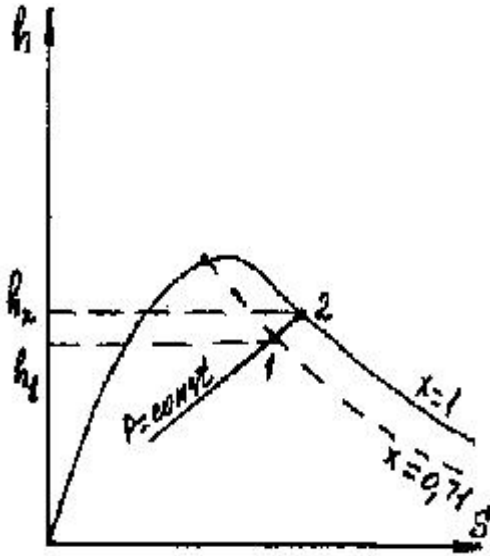


Рисунок 9.4 - h, s- диаграмма

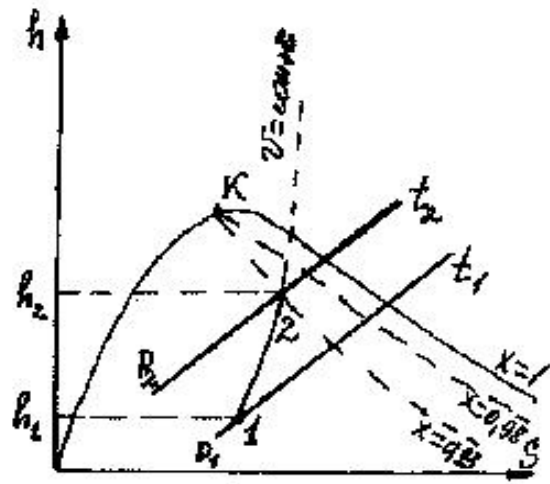


Рисунок 9.5 - h, s- диаграмма

Решение. На h,s- диаграмме (рисунок 9.4) находится изобара, соответствующая заданному давлению. При любой степени сухости, не равной 1, берется точка 1.

Точка 2 будет лежать на пересечении заданной изобары с верхней пограничной кривой. Тогда:

$$q = h_2 - h_1 = r(1 - x);$$

$$r = (h_2 - h_1) / (1 - x) = (2794 - 2320) / (1 - 0,71) = 1638 \text{ кДж/кг.}$$

9.18 Пар массой 1 кг при давлении 3 МПа имеет степень сухости  $X = 0,7$ . Какое количество теплоты необходимо затратить, чтобы степень сухости подвести до  $X = 0,91$ ?

9.19 Влажный пар при давлении 1,1 МПа имеет степень сухости  $X = 0,8$ . Какое количество теплоты необходимо подвести к 1 кг этого пара, чтобы при постоянном давлении перевести его в состояние сухого насыщенного?

9.20 Пар массой 10 кг занимает объем  $2 \text{ м}^3$  при давлении  $P_1 = 0,7 \text{ МПа}$ . Найти количество теплоты, которое необходимо сообщить пару, чтобы, не изменяя занимаемый им объем, повысить давление до  $P_2 = 0,9 \text{ МПа}$ . Каковы будут температура и степень сухости в конце процесса?

Решение. Удельный объем пара  $v = \frac{V}{G} = 2/10 = 0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$ . На h,s- диаграмме (рисунок 9.5) начальная точка 1 лежит на пересечении изохоры  $0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$  и изобары, соответствующей  $0,7 \text{ МПа}$ , энтальпия этого состояния  $h_1 = 2204 \text{ кДж/кг}$ . Конечная точка 2 – на пересечении заданной изохоры и изобары  $0,9 \text{ МПа}$ , энтальпия в этом случае  $h_2 = 2630 \text{ кДж/кг}$ ,  $X = 0,93$ .

Температуру находим, продолжая изобару 0,9 МПа до пересечения с верхней пограничной кривой,  $t = 166^\circ\text{C}$ . Для изохорного процесса

$$q = (h_2 - h_1) - v_2(P_2 - P_1) = 2630 - 2204 - 0,2 (0,9 - 0,7) \cdot 10^3 = 386 \text{ кДж/кг}.$$

9.21 Сухой насыщенный пар занимает объем  $v = 0,18 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Какое количество теплоты надо затратить, чтобы нагреть его при постоянном объеме до температуры  $450^\circ\text{C}$ ? Чему будет равно давление в конце процесса?

9.22 Пар со степенью сухости  $X = 0,726$  и давлением 0,1 МПа расширяется изотермически до сухого насыщенного состояния. Найти изменение удельной внутренней энергии и теплоту процесса.

9.23 Пар массой 1 кг, начальное состояние которого определяется температурой  $t = 350^\circ\text{C}$  и давлением  $P_1 = 0,16 \text{ МПа}$ , сжимается изотермически так, что от него отводится 1315 кДж/кг теплоты.

Найти давление в конце сжатия, изменение внутренней энергии и работу процесса.

Решение.  $q = T (S_2 - S_1)$ ;  $S_2 = (TS_1 - q) / T = 6,06 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}$ . На пересечении изоэнтропы (адиабаты)  $S = 6,06 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}$  и заданной изотермы по  $h, s$ - диаграмме (рисунок 9.6). Находим  $P_2 = 9 \text{ МПа}$  и все остальные параметра состояния, соответствующие начальной 1 и конечной 2 точкам процесса:

	T, К	P, МПа	$v$ , $\text{м}^3/\text{кг}$	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/кг · К
ТОЧКА 1	623	0,16	1,8	3176	8,17
ТОЧКА 2	623	9,0	0,026	2968	6,06

Далее проводим необходимые расчеты:

$$\Delta U = h_2 - h_1 - (P_2 v_2 - P_1 v_1) = 2968 - 3176 - (9 \cdot 0,026 - 0,16 \cdot 1,8) 10^3 = -154 \text{ кДж/кг};$$

$$l = \Delta U - q = (-154) - 1315 = -1469 \text{ кДж/кг}.$$

9.24 Сухой насыщенный пар с давлением 0,09 МПа сжимается по изоэнтропе (адиабате) до  $P_2 = 10 P_1$ . Определить конечную температуру, работу и располагаемую работу процесса.

9.25 Пар при давлении 3,5 МПа и температуре  $t = 450^\circ\text{C}$  расширяется изоэнтропно (адиабатно) до сухого насыщенного состояния, а затем охлаждается при постоянном объеме до температуры  $120^\circ\text{C}$ . Определить работу процесса, располагаемую работу и количество теплоты, переданное во внешнюю среду.

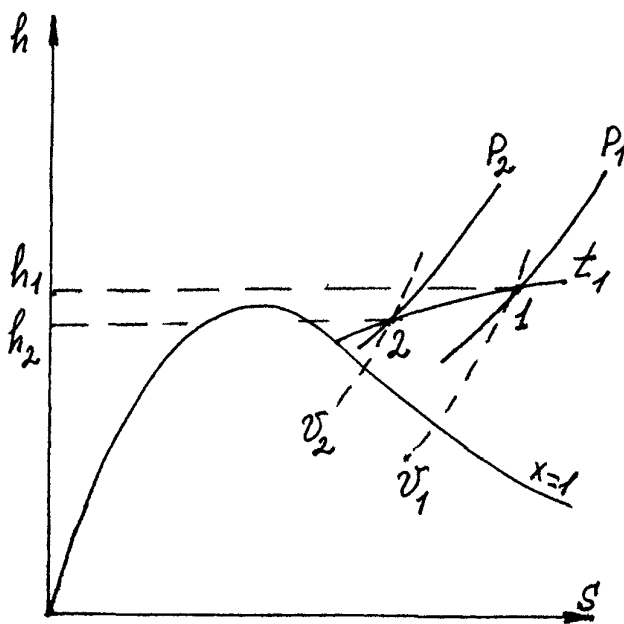


Рисунок 9.6 – h,s- диаграмма

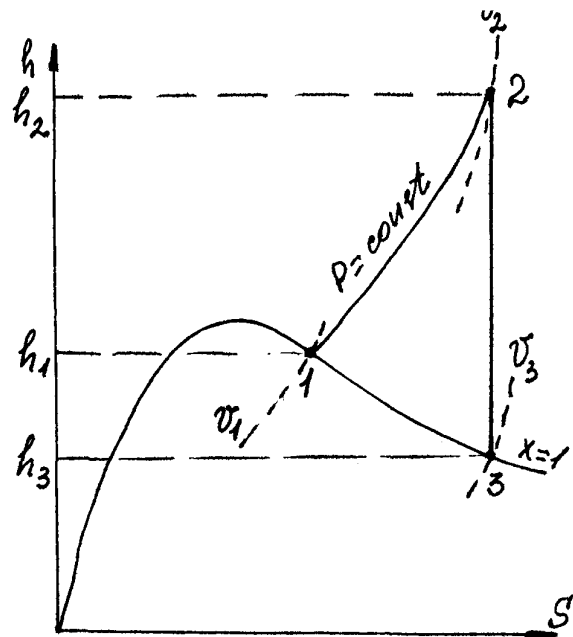


Рисунок 9.7 - h,s- диаграмма

9.26 Сухой насыщенный пар перегревается при постоянном давлении  $P = 11 \text{ МПа}$  до температуры  $510^\circ \text{C}$ , затем расширяется по изоэнтропе (адиабате) вновь до состояния сухого насыщенного пара.

Найти теплоту перегрева, изменение внутренней энергии и энтальпии пара в сложном процессе.

Решение. Процесс состоит из двух частей: изобарный перегрев и изоэнтропное (адиабатное) расширение. Процесс наносим на h,s-диаграмму (рисунок 9.7), по которой определяем параметры состояния в трех характерных точках процесса и заносим в таблицу 9.3.

Таблица 9.3 – Параметры состояния

Точка	P, МПа	$v$ , $\text{м}^3/\text{кг}$	$h$ , кДж/кг
1	11	0,017	2704
2	11	0,030	3588
3	1,05	0,195	2780

Далее проводим расчеты:

$$q_{\text{пер}} = h_2 - h_1 = 3588 - 2704 = 884 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta U_{12} = h_2 - h_1 - P (v_2 - v_1) = 884 - 11 (0,03 - 0,017) 10^3 = 741 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta U_{23} = h_3 - h_1 - (P_3 v_3 - P_2 v_2) = 2780 - 3588 (1,05 \cdot 0,195 - 11 \cdot 0,03) 10^3 = 682,75 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta h = h_3 - h_1 = 2780 - 2704 = 76 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta U = \Delta U_{12} + \Delta U_{23} = 741 - 682,75 = 58,25 \text{ кДж/кг}.$$

## 10 ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПАРОВОГО ЦИКЛА

### Условие задания

Цикл отнесен к 1 кг водяного пара и задан в  $P, v$ - координатах.

Требуется :

1. Перенести его схематично в  $T, s$ - и  $h, s$ -диаграммы.
2. Для каждой точки, входящей в цикл, определить параметры  $P, v, T, h, s, u$ , максимально используя  $h, s$ - диаграмму. Результаты свести в таблицу 10.1.
3. Для каждого процесса цикла определить  $q, l, \Delta h, \Delta s, \Delta u$ . Результаты свести в таблицу 10.2. Учитывая полученные знаки, просуммировать все столбцы по вертикали.

Таблица 10.1 – Параметры состояния в основных точках цикла

Параметры точки	$P, \text{кН/м}^2$	$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$T, \text{К}$	$h, \text{кДж/кг}$	$u, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж/кг} \cdot \text{К}$	$x$
1							
2							
3							
4							

Таблица 10.2 – Энергетические результаты процессов цикла и изменение тепловых характеристик состояния

Процессы	$l, \text{кДж/кг}$	$q, \text{кДж/кг}$	$\Delta u, \text{кДж/кг}$	$\Delta h, \text{кДж/кг}$	$\Delta s, \text{кДж/кг} \cdot \text{К}$
1 – 2					
2 – 3					
3 – 4					
4 – 1					
Сумма					

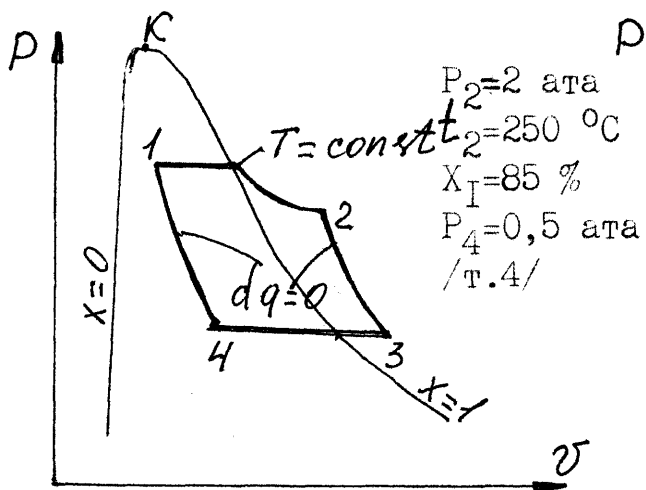
4. Для цикла в целом найти:  
 подведенное тепло  $\sum q_1$ ;  
 отведенное тепло  $\sum q_2$ ;  
 работу цикла, термический к.п.д.
5. Для отмеченной точки (на схеме она приведена в прямоугольнике) найти  $s$  с помощью паровых таблиц и  $h, s$ - диаграммы:  
 Результаты поместить в таблицу 10.3

Таблица 10.3 – Сравнительные результаты параметров состояния

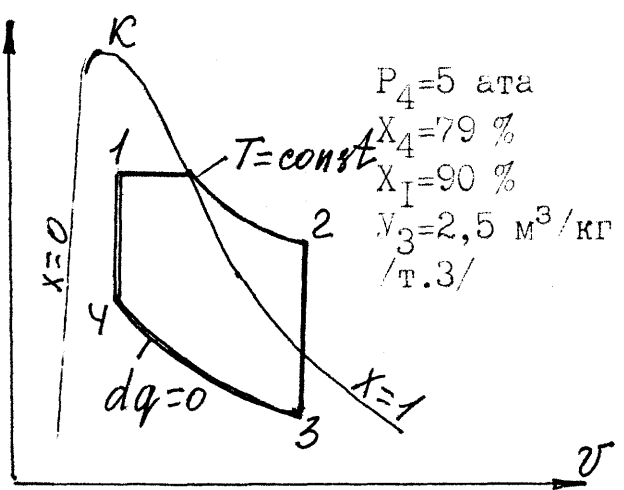
Параметры	По $h$ - $S$ – диаграмме	С помощью таблиц водяного пара
$V_x$		
$h_x$		
$S_x$		
$U_x$		

Циклы даны в  $P, v$ - диаграмме без учета масштаба.

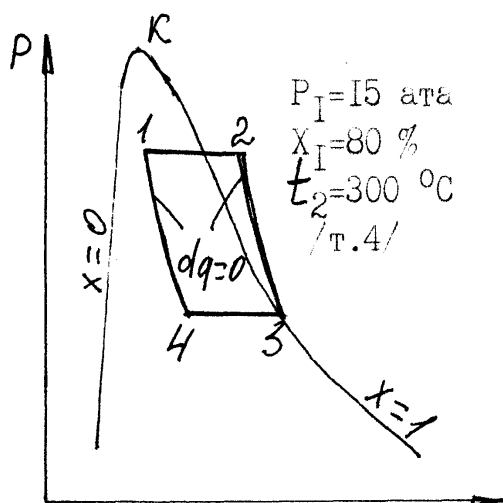
Вариант 1



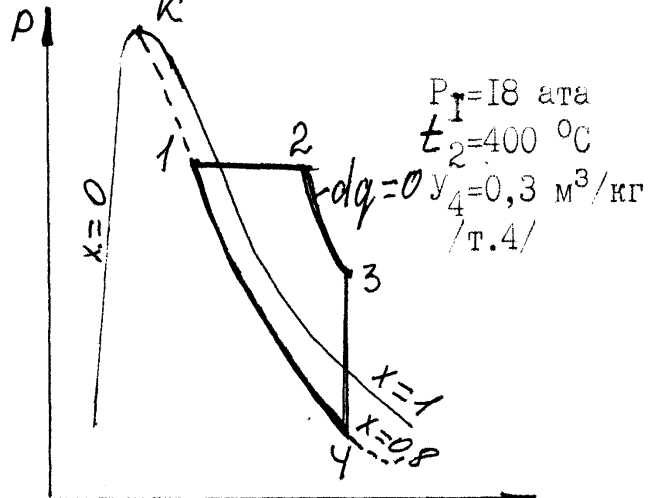
Вариант 2



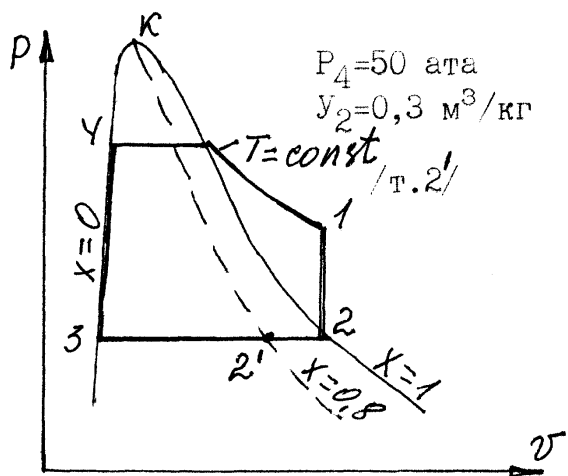
Вариант 3



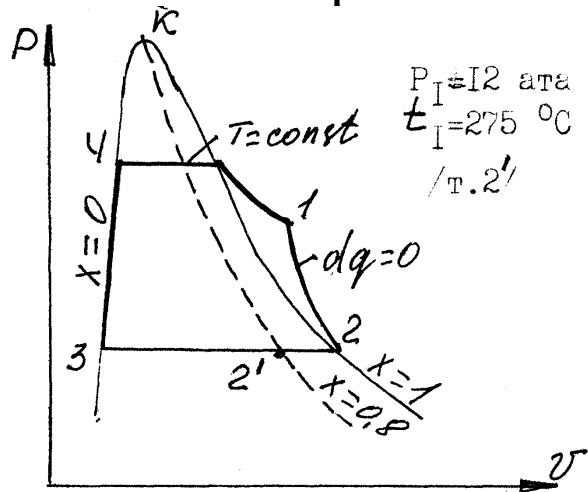
Вариант 4



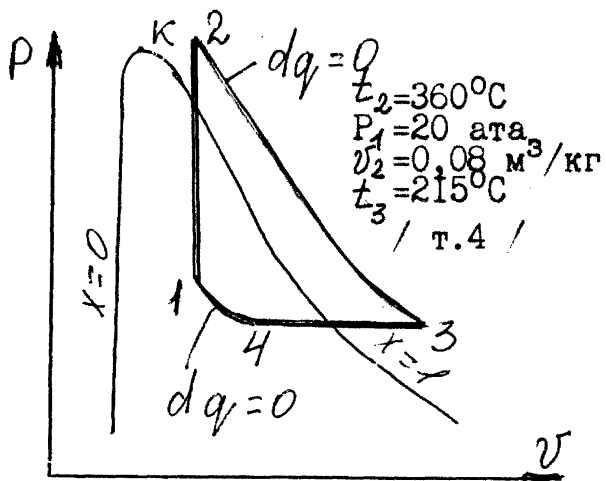
Вариант 5



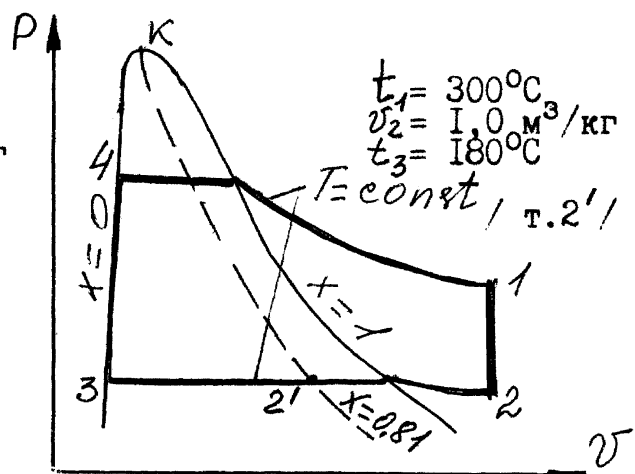
Вариант 6



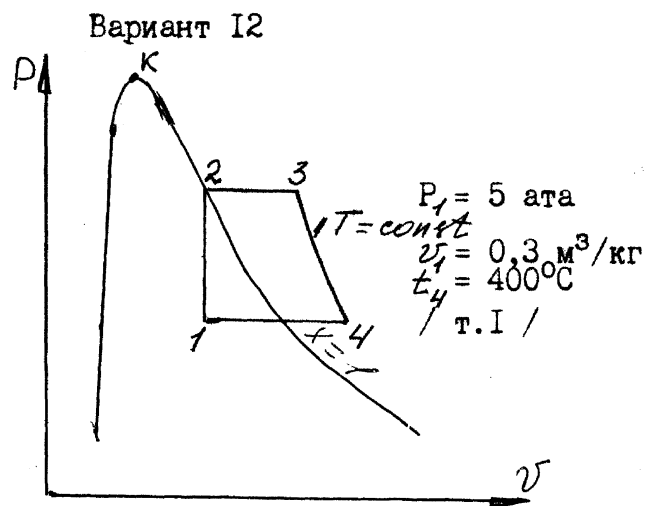
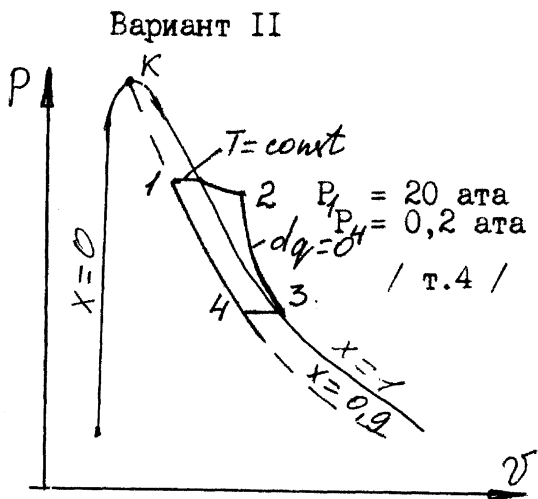
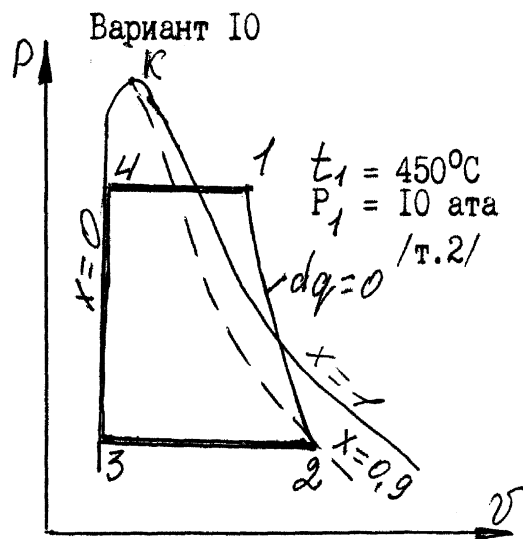
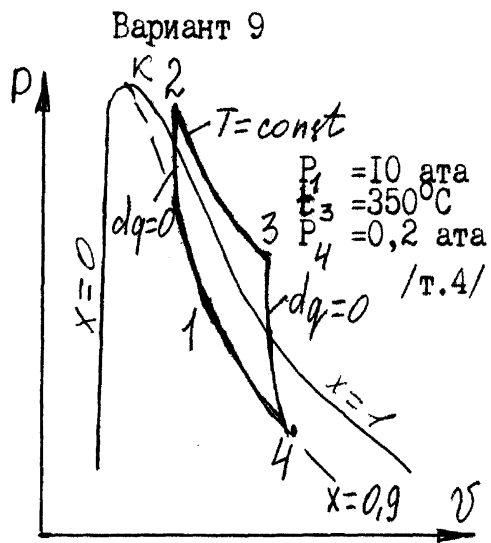
Вариант 7

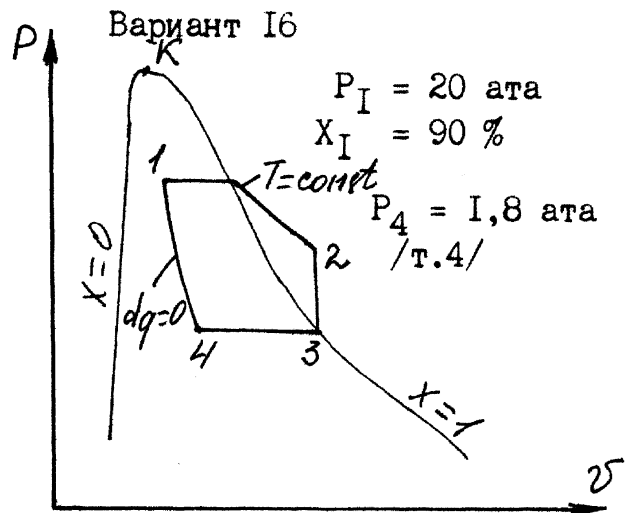
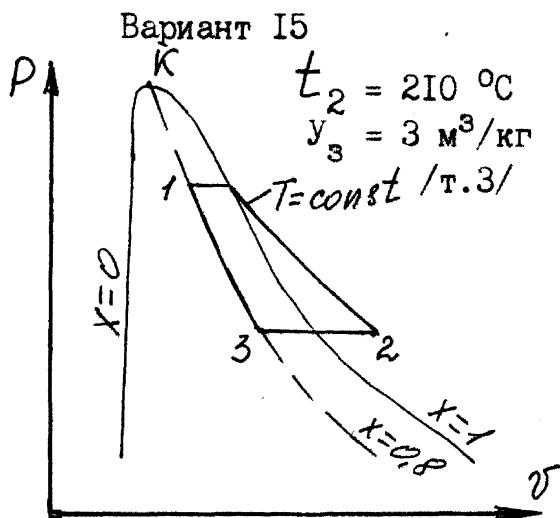
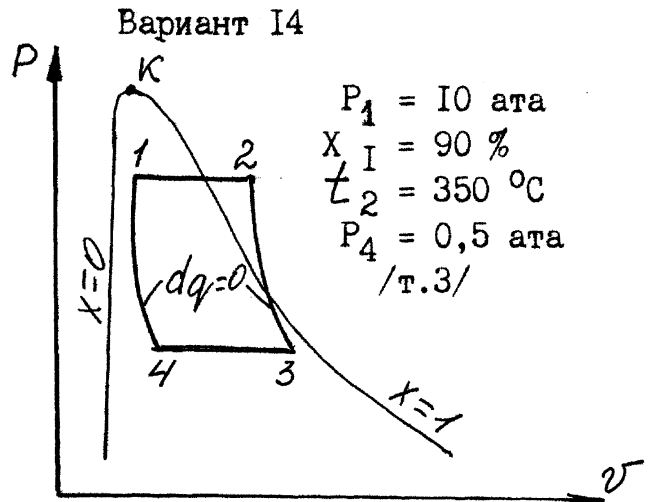
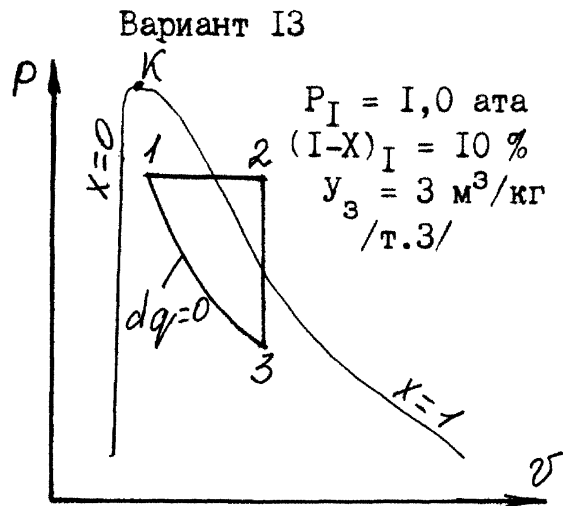


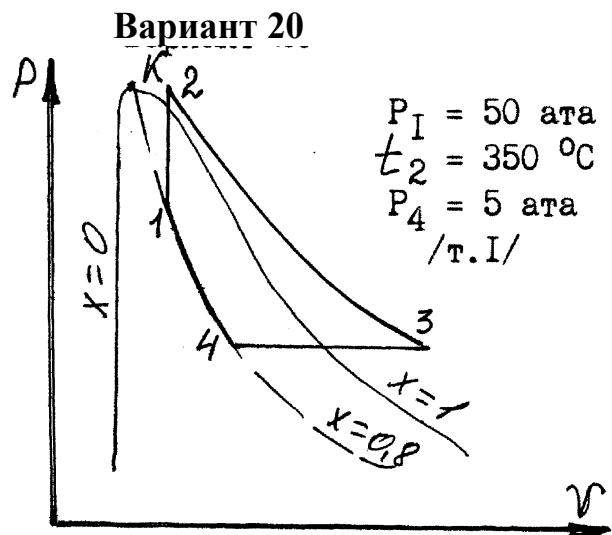
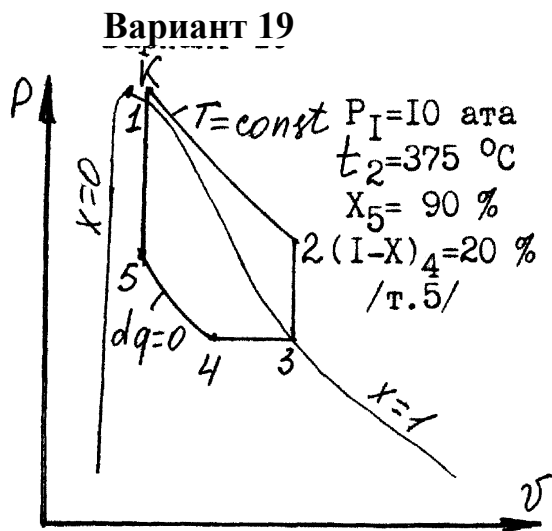
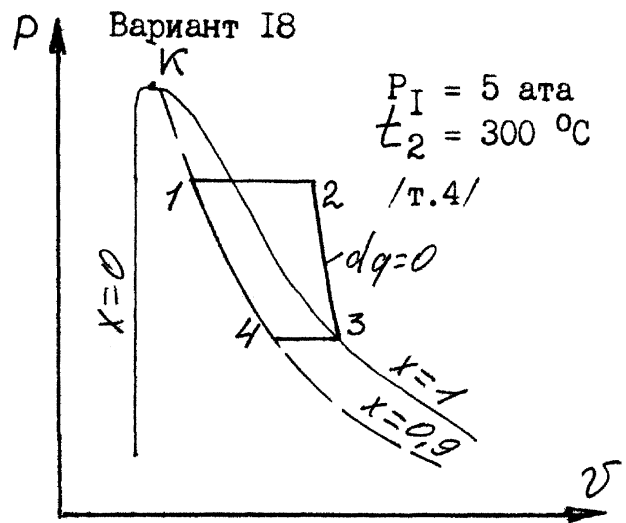
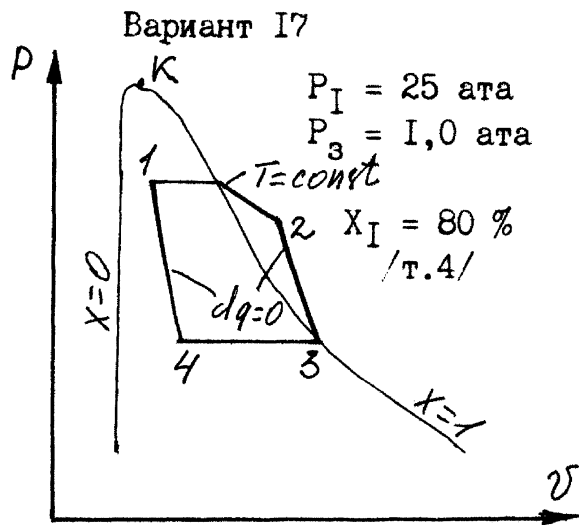
Вариант 8

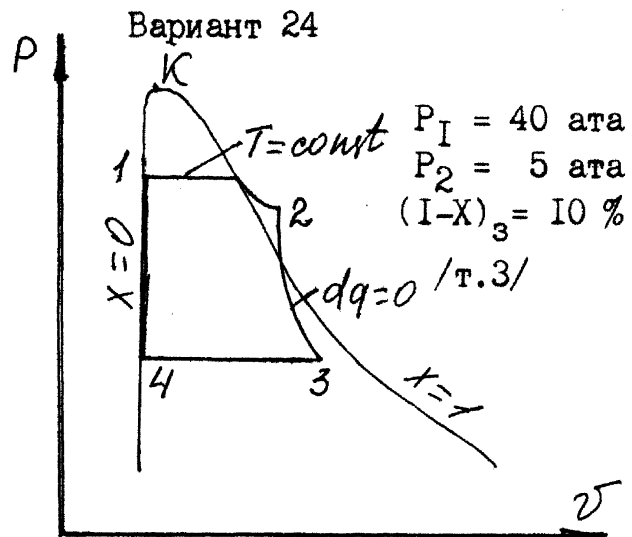
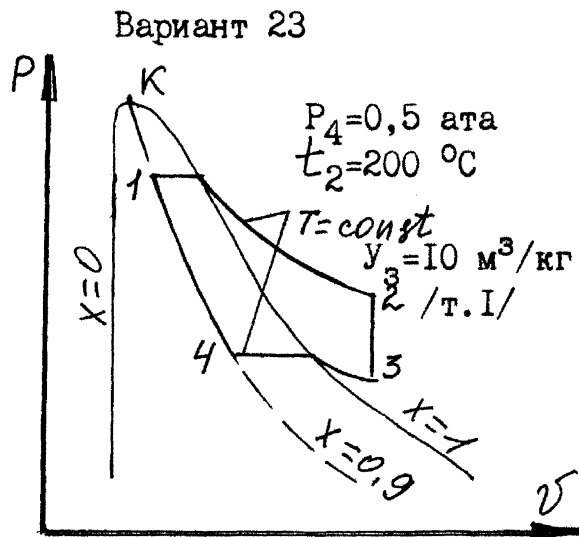
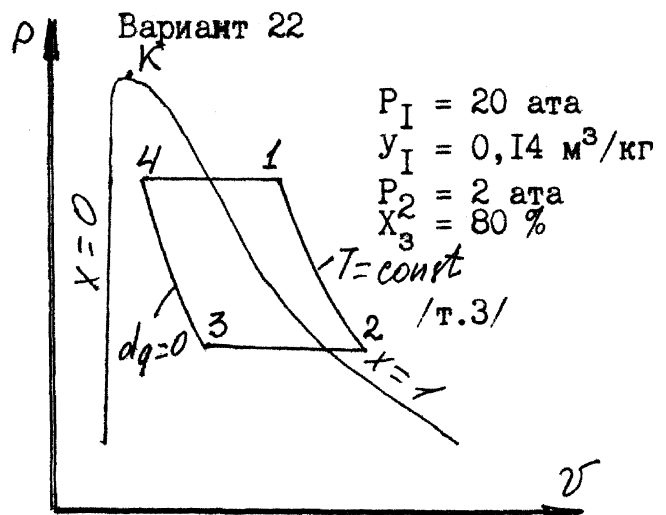
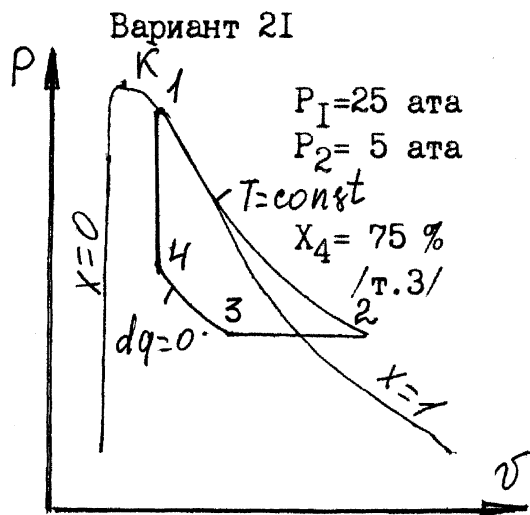


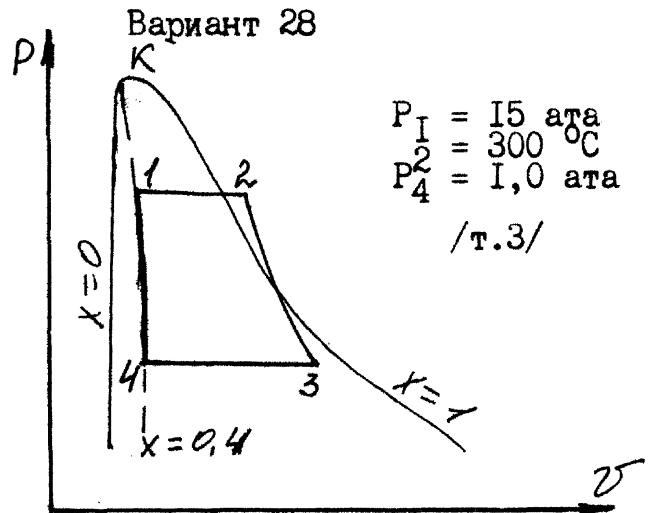
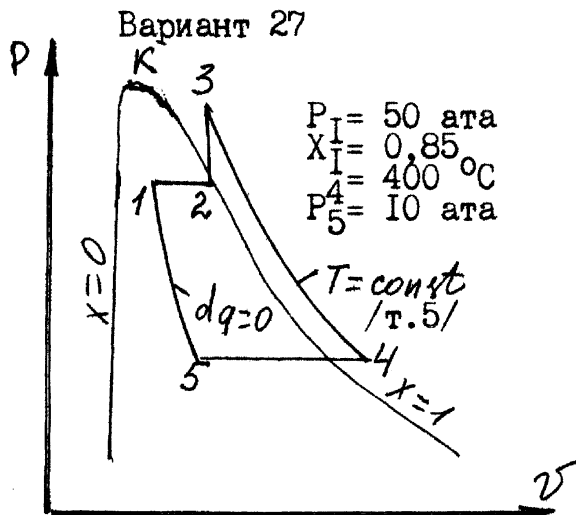
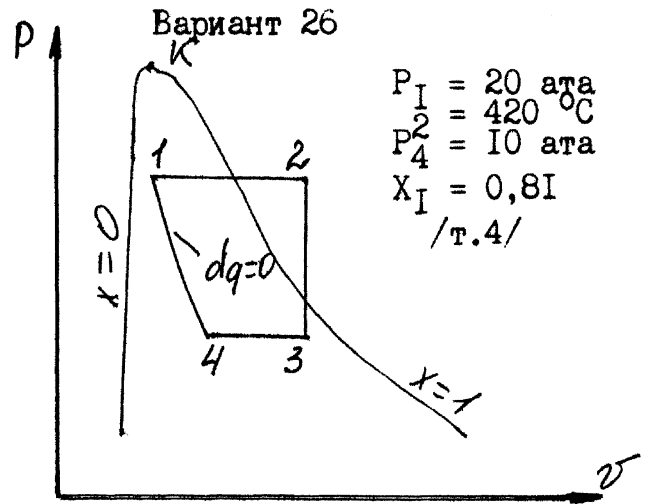
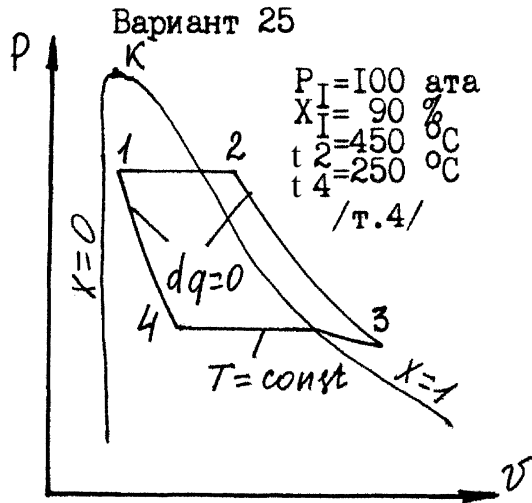


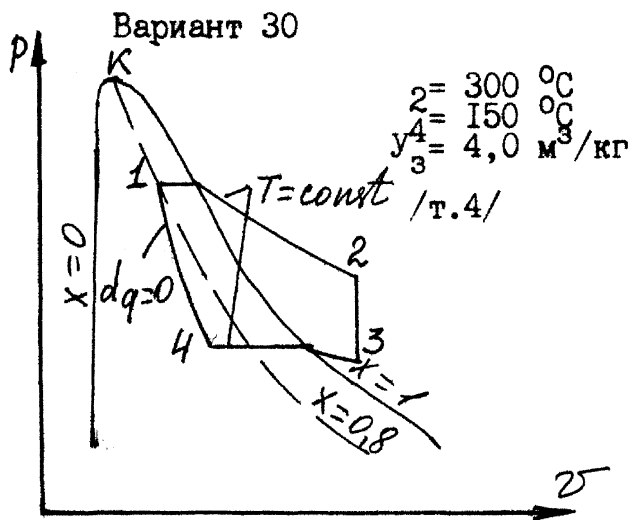
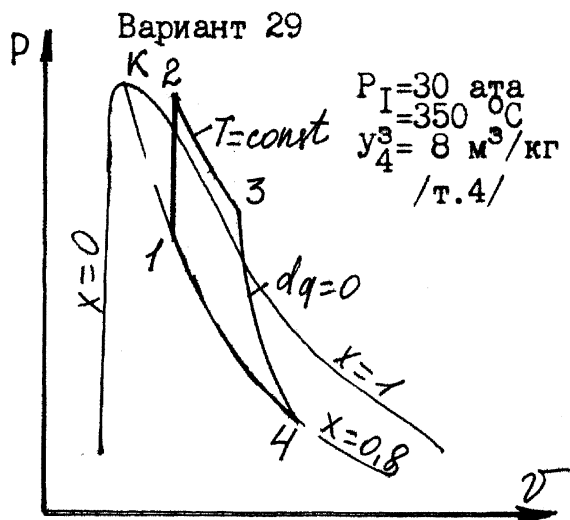












### Библиографический список

1. Нащокин, В.В. Техническая термодинамика и теплопередача [Текст]/ В.В. Нащокин. – М., 1985. – 469 с.
2. Алабовский, А.Н. Техническая термодинамика и теплопередача [Текст]: учеб. пособие. – 3-е изд., перераб. и доп. / А.Н. Алабовский, И.А. Недужий. – Киев: Выща шк., 1990. – 255 с.
3. Техническая термодинамика [Текст] / под ред. В.И. Крутова. – М.: Высшая школа, 1981. – 439 с.
4. Теплотехника [Текст] / под ред. В.И. Крутова. – М.: Машиностроение, 1986. – 432 с.
5. Брдлик, П.М. Теплотехника и теплоснабжение предприятий лесной и деревообрабатывающей промышленности [Текст]: учебник для вузов/ П.М. Брдлик, А.В. Морозов, Ю.П. Семенов. – М.: Лесн. пром-сть, 1988. – 456 с.
6. Теплотехника [Текст] / под ред. Л.В. Луканина. – М.: Высшая школа, 1999. – 453 с.
7. Техническая термодинамика и теплопередача [Текст] / А.В. Арнольд [и др.]. – М.: Высшая школа, 1979. – 446 с.
8. Ривкин, С.Л. Теплофизические свойства воды и водяного пара [Текст] / С.Л. Ривкин, А.А. Александров. – М.: Энергия, 1980. – 424 с.
9. СТП 3.4.204-01. Система вузовской учебной документации. Требования к оформлению текстовых документов. – Введ. 01.01.01. – СибГТУ, 2001. – 46 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ Е  
(обязательное)  
РАСЧЕТ ЦИКЛА ПАРОСИЛОВОЙ УСТАНОВКИ  
Условие задания

1. **Дано:** паросиловая установка мощностью  $N$  работает по циклу Ренкина. Начальные параметры пара  $P_1$  и  $t_1$  давление в конденсаторе  $P_2$ . Внутренний относительный КПД турбины  $\eta_{oi}$ .

Определить:

1. Параметры пара и воды в крайних точках цикла.
2. Термический и внутренний абсолютный КПД цикла.
3. Удельный и часовой расход пара.
4. Удельный и часовой расход тепла.

5. Эффективный абсолютный КПД: всей установки, если КПД котельного агрегата  $\eta_{KA} = 0,9$ ; механический КПД турбины  $\eta_M = 0,98$ ; КПД электрогенератора  $\eta_{Э} = 0,99$ ; КПД, учитывающий потери тепла паропроводами  $\eta_{мп} = 0,99$ .

6. Расход охлаждающей воды через конденсатор, если вода нагревается на  $10^\circ\text{C}$ .

Данные для расчета принять согласно номеру задания.

**Примечание.** Расчет цикла паросиловой установки выполнить с использованием  $h-S$  диаграммы водяного пара и таблиц теплофизических свойств воды и водяного пара. Результаты расчета параметров рабочего тела в различных точках цикла занести в таблицу вида:

Р МПа	t °C	T К	V м <sup>3</sup> /кг	h кДж/кг	S кДж/кг·К	x
1						
2						

и т.д.

Построение цикла паросиловой установки в  $p-V$ ,  $T-S$  и  $h-S$  координатах выполнить на фоне пограничных кривых. Пограничные кривые построить по таблицам. Координаты точек, по которым будут построены пограничные кривые, привести в пояснительной записке.

Для наглядности вместо  $p-V$  координат применить полулогарифмическую систему координат ( $p-lg V$ ).

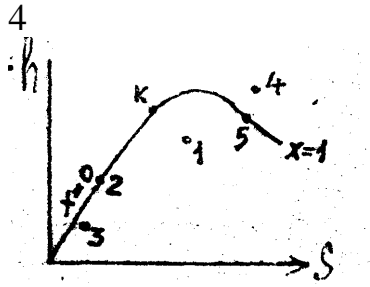
Кривые процессов строить по промежуточным точкам, Все построения выполнить на миллиметровой бумаге форматом 210x297 мм.

При подготовке к выполнению и защите задания обратить внимание на вопросы:

I. Процесс парообразования. Линии насыщения. Влажный насыщенный пар. Степень сухости пара. Сухой насыщенный пар. Перегретый пар;  $p-V$ ,  $T-S$  и  $h-S$  диаграммы водяного пара.

2. Определение параметров водяного пара по  $h-S$  диаграмме и таблицам теплофизических свойств водяного пара.
3. Цикл Карно для паросиловой установки.
4. Схема паросиловой установки.
5. Цикл Ренкина. Изображение цикла Ренкина в  $p-V$ ,  $T-S$  и  $h-S$  координатах.
6. Термический КПД цикла Ренкина, факторы, влияющие на его величину.
7. Внутренний абсолютный и внутренний относительный к.п.д. паросиловой установки.

### Вопросы для самопроверки

Вопрос	Ответы (из данных ответов выбрать правильные)
I	2
1. Энтальпия пара при $P=3,0$ МПа, $t = 400^\circ\text{C}$ равна:	а) $0,1 \text{ кДж/кг}$ ; б) $3230 \text{ кДж/кг}$ ; в) $6,5 \text{ кДж/кг}$ .
2. Температура пара при $P=0,2$ МПа, $X = 0,95$ равна:	а) $119^\circ\text{C}$ ; б) $150^\circ\text{C}$ ; в) $50^\circ\text{C}$
3. При одном и том же давлении между температурой кипящей воды $t_n$ , сухого насыщенного пара $t_{cn}$ и влажного насыщенного пара $t_{sn}$ имеет место соотношение:	а) $t_m < t_{cn} = t_{sn}$ ; б) $t_m = t_{cn} = t_{sn}$ ; в) $t_m < t_{sn} = t_{cn}$
4. 	а) воду при $t < t_n$ б) воду при $t = t_m$ в) сухой насыщенный пар, г) влажный насыщенный пар, д) перегретый пар.
В точках 1, 2, 3, 4, 5 рабочее тело представляет собой:	
5. В цикле ПСУ подвод тепла к рабочему телу осуществляется в:	а) паровом котле; б) турбине;
6. Преобразование внутренней энергии в работу осуществляется в:	в) конденсаторе; г) питательном насосе.



- 
7. Величина располагаемого теплоперепада а)  $h_1 - h_4$ ;  
равна: б)  $h_1 - h_2$ ;
8. Величина действительно использованного в)  $h_1 - h_{2g}$ ;  
теплоперепада равна; г)  $h_2 - h_4$ .
9. Количество тепла, отводимого от рабочего тела  
равно:
- 
10. Количество затраченного тепла в цикле ПСУ а) увеличится,  
с увеличением температуры пара на выходе из б) уменьшится;  
котла (при прочих одинаковых условиях) в) останется без изменения
- 

### Пример расчета цикла

**Дано:**  $N = 1000$  кВт;  $P_1 = 5,0$  МПа;  $t_1 = 500^\circ\text{C}$ ;  $P_2 = 0,002$  МПа;  $\eta_{oi} = 0,85$ .

**Решение:**

а) Определение параметров пара в крайних точках цикла и изображение в координатах  $p$ - $V$ ,  $T$ - $S$  и  $h$ - $S$ .

Параметры пара в крайних точках цикла паросиловой установки определяются по диаграмме  $h$ - $S$  водяного пара и по таблицам.

Вначале находят параметры пара перед двигателем. Поскольку известны значения давления и температуры пара перед турбиной, то положение точки 1 на диаграмме  $h$ - $S$  находится на пересечении изобары  $P_1 = 5,0$  МПа и изотермы  $t_1 = 300^\circ\text{C}$ . Определив местонахождение точки 1 на диаграмме  $h$ - $S$  находим значение энтальпии, энтропии и удельного объема пара.

В идеальном цикле паросиловой установки расширение пара в турбине происходит без потерь энергии пара на трение и без теплообмена с внешней средой (т.е. адиабатически). Так как при адиабатическом процессе энтропия рабочего тела остается постоянной, то положение в  $h$ - $S$  диаграмме точки 2, характеризующей состояние отработанного пара при идеальном его расширении в турбине, определится на пересечении изобары  $P_2 = 0,002$  МПа и линии постоянной энтропии  $S_1 = 6,96$  кДж/кг К

Определив местонахождение точки 2 на диаграмме  $h$ - $S$ , находим значение энтальпии, удельного объема, степени сухости и температуры пара после его адиабатического расширения в турбине. Температура влажного насыщенного пара в  $h$ - $S$  диаграмме определяется следующим образом: из данной точки проводится изобара до пересечения с верхней пограничной кривой и определяется температура сухого насыщенного пара, которая равна температуре влажного насыщенного пара независимо от степени сухости и. температуре насыщения воды при том же давлении.

При реальном расширении пара в турбине часть располагаемого теплорепепада расходуется на преодоление различных аэродинамических сопротивлений при течении пара через проточную часть турбины. Эти потери оцениваются внутренним относительным КПД турбины:

$$\eta_{oi} = \frac{h_2}{h} = \frac{h_1 - h_{2g}}{h_1 - h_2},$$

где  $h = h_1 - h_2$  - располагаемый теплорепепад,  
 $h_g = h_1 - h_{2g}$  - действительно используемый теплорепепад,  
 $h_{2g}$  - энтальпия отработавшего пара при реальном расширении  
 пара в турбине.

Из соотношения  $\eta_{oi}$  определяется энтальпия пара в точке 2g

$$h_{2g} = h_1 - (h_1 - h_2) \cdot \eta_{oi}$$

$$3432 - (3432 - 2030) \cdot 0,85 = 2240,3 \text{ кДж/кг.}$$

Местонахождение в диаграмме  $h-S$  точки 2g, характеризующей состояние отработанного пара при реальном его расширении в турбине (с учетом потерь на трение), определяется на пересечении изобары  $P_2$  и линии постоянной энтальпии  $h_{2g}$ . Найдя точку 2g на диаграмме  $h-S$ , определяем все параметры пара в этой точке.

Конденсация отработавшего пара в конденсаторе (процесс 2-3) осуществляется при постоянном давлении, параметры конденсата в точке 3 определяются по таблицам по давлению в конденсаторе  $P_2 = 0,002$  МПа для воды в состоянии насыщения.

В результате повышения давления конденсата питательным насосом (процесс 3-4) давление конденсата становится равным давлению в котле  $P_1 = 5,0$  МПа, остальные параметры в этом процессе остаются без изменения, в том числе и удельный объем в силу несжимаемости жидкости.

Процессы нагрева конденсата до температуры кипения (процесс 4-5), парообразование до получения сухого насыщенного пара (процесс 5-6) и перегрев пара в пароперегревателе (процесс 6-1) осуществляется при постоянном давлении  $P_1 = 5,0$  МПа

Параметры воды и пара в точках 5 и 6 определяются по таблицам по давлению  $P_1 = 5,0$  МПа для воды и пара в состоянии насыщения.

Построение цикла в  $P-V$ ,  $T-S$  и  $h-S$  координатах производится по найденным значениям соответствующих параметров в крайних точках цикла. Процессы 1-2 и 1-2g в  $P-V$  диаграмме, 6-1 и 1-2g в  $h-S$  и  $T-S$

диаграммах изображаются кривыми линиями и строятся по промежуточным точкам. Промежуточные точки на линиях 1-2 и 6-1 выбираются произвольно, параметры в этих точках определяются по  $h$ - $S$  диаграмме. Промежуточные точки на линии 1-2g в  $h$ - $S$  диаграмме определяются по такой же методике, как и точка 2g; значение  $\eta_{oi}$  принять постоянным по длине проточной части турбины (например, в точке "Г" принимаем  $P = 10,0$  МПа, тогда  $h_r = h_1 - (h_1 - h_a) \cdot \eta_{oi}$

После построения цикла паросиловой установки в  $P$ - $V$ ,  $T$ - $S$  и  $h$ - $S$  диаграмме необходимо провести на этих диаграммах верхнюю и нижнюю пограничную кривые. Данные для построения этих кривых берутся из таблиц. Пограничные кривые строить по 7-8 промежуточным точкам.

Графики цикла в  $P$ - $V$ ,  $T$ - $S$  и  $h$ - $S$  координатах представлены на рис.3, 4, 5.

б) Термический КПД цикла, определяемый как отношение тепла, полезно использованного в цикле, ко всему теплу, подведенному к рабочему телу определяется из выражения;

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_4} = \frac{3432 - 2030}{3432 - 73.52} = 0,418$$

Внутренний абсолютный КПД цикла, определяемый как отношение действительно использованного теплоперепада ко всему теплу, подведенному к рабочему телу, определяется из выражения.

Таблица 1 - Параметры состояния в крайних точках цикла паросиловой установки

номера точек цикла		$P$ МПа	$t$ °C	$T$ К	$V$ м³/кг	$h$ кДж/кг	$S$ кДж/кг·К	$x$
500		5,00		773	0,069	3432	6,96	Перегр. пар
2		0,002	17,5	290,5	52,0	2030	6,96	0,794
2g		0,002	17,5	290,5	59,0	2240,3	7,72	0,882
3		0,002	17,5	290,5	0,001	73,52	0,2609	0,
4		5,00	17,5	290,5	0,001	73,52	0,2609	0
5		5,00	263,9	536,9	0,00128	1154,4	2,921	0
6		5,00	263,9	536,9	0,0394	2794	5,973	1
проц с 1-2	a	1,00	265	538	0,24	2972	6,96	Перегр. пар

	б	0,14	109	382	1,2	2588	6,96	0,92
	в	0,012	49,5	322,5	10,0	2240	6,96	0,851
Процесс 1-2	г	1,0	295	568	0,25	3041	7,1	Перегр. пар
	д	0,14	120	393	13	2715	7,34	Перегр. пар
Процесс 6-1	е	0,012	495	322,5	11,5	2417	7,55	0,928
	ж	5,0	350	623	0,051	3064	6,46	Перегр. пар

$$\eta_i = \frac{h_1 - h_{2g}}{h_1 - h_4};$$

$$\eta_i = \frac{3432 - 2240,3}{3432 - 73,52} = 0,355$$

в) Удельный расход пара (расход пара, необходимый для выработки 1 кВт/ч электроэнергии):

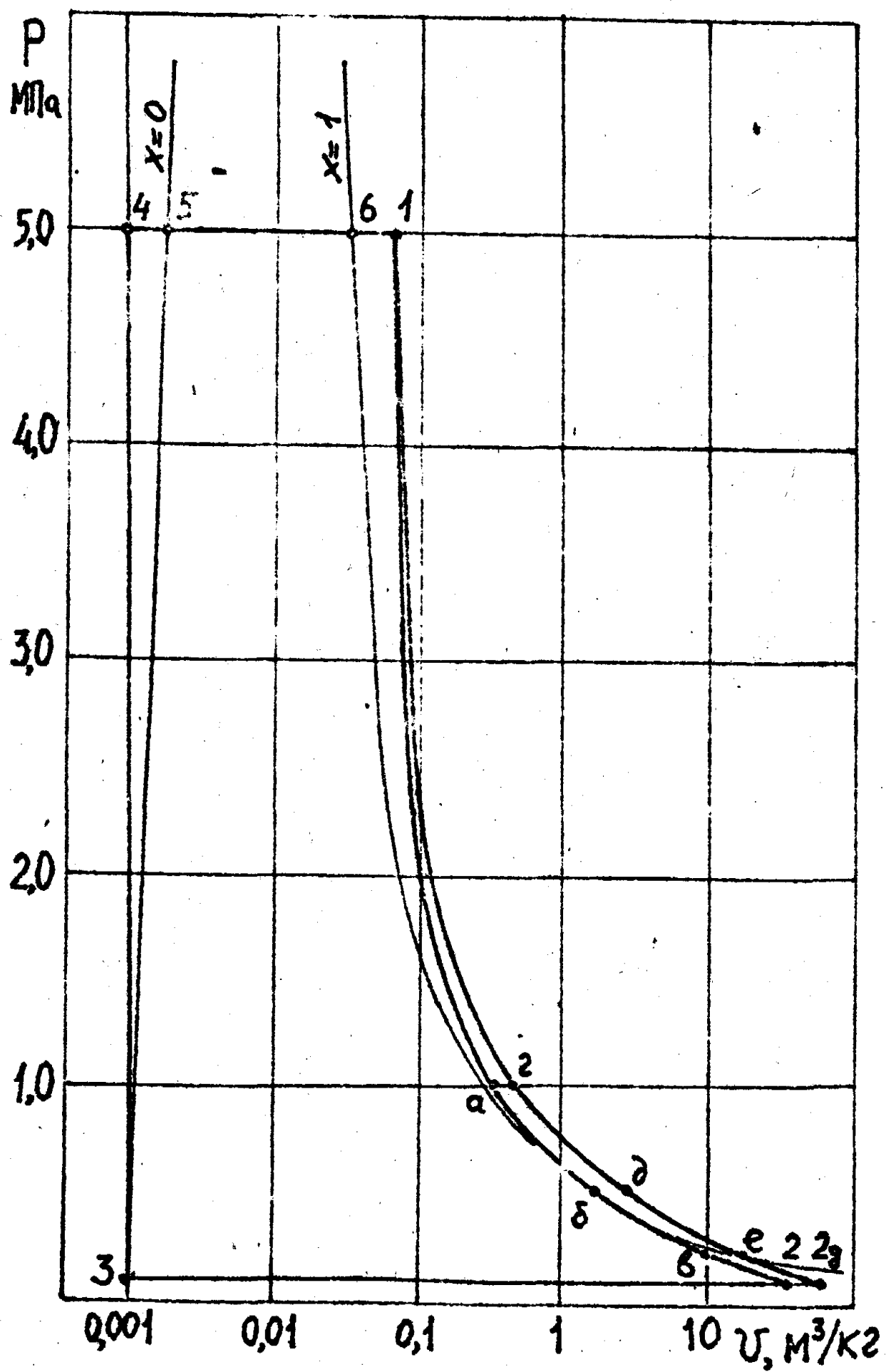
$$d = \frac{3600}{h_1 - h_{2g}} = \frac{3600}{3432 - 2240,3} = 3,02 \text{ кг} / \text{кВтч}$$

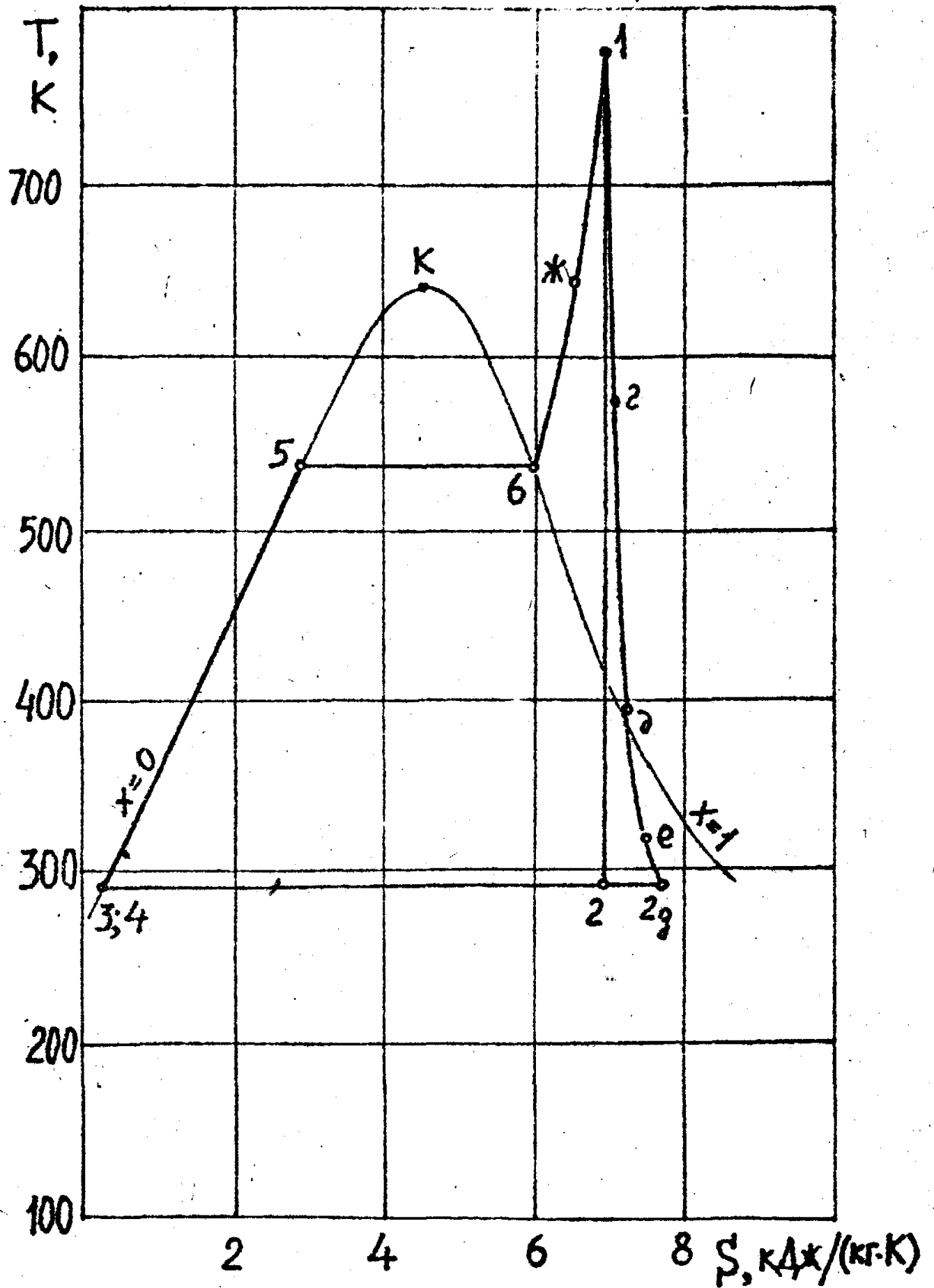
Часовой расход пара

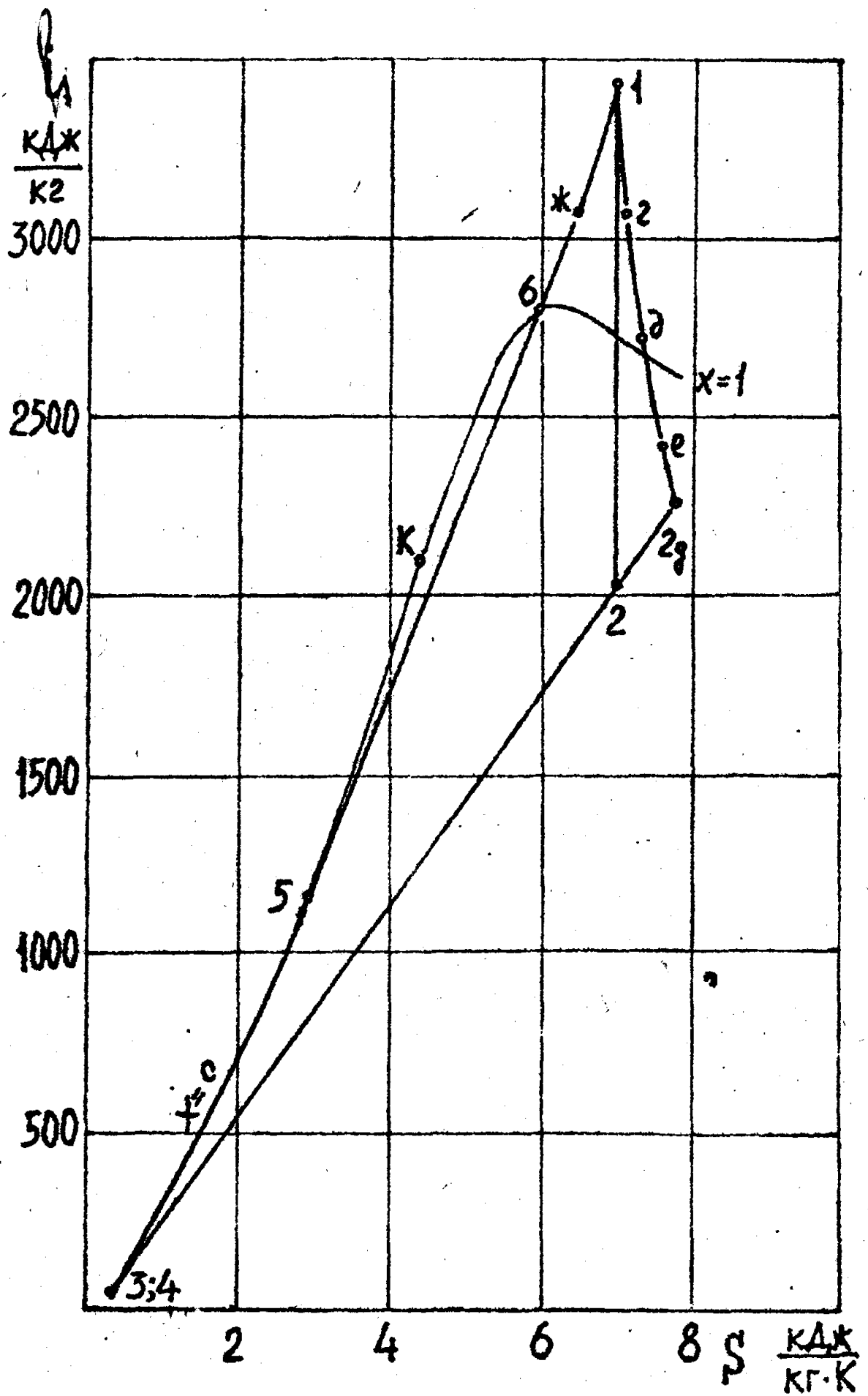
$$D = N \cdot d = 1000 \cdot 3,02 = 3020 \text{ кг} / \text{ч}$$

г) Удельный расход тепла:

$$q = d(h_1 - h_4) = 3,02(3432 - 73,52) = 10120 \text{ кДж} / \text{кВтч}$$







Часовой расход тепла;

$$Q = q \cdot N = 10120 \cdot 1000 = 10,12 \cdot 10^6 \text{ кДж} / \text{ч}$$

д) Эффективный абсолютный КПД установки;

$$\eta_{\text{э}} = \eta_{\text{ка}} \cdot \eta_i \cdot \eta_m \cdot \eta_{\text{с}} \cdot \eta_{\text{м}} = 0,99 \cdot 0,355 \cdot 0,98 \cdot 0,99 \cdot 0,99 = 0,337$$

е) Расход охлаждающей воды, необходимой для конденсации пара, определяется из уравнения теплового баланса конденсатора:

$$D(h_{2g} - h_3) = G_B C_B \Delta t_6$$

где  $D(h_{2g} - h_3)$  - количество тепла, отводимое от пара охлаждающей водой до его

полной конденсации;

$G_B C_B \Delta t_6$  - количество тепла, переданного паром охлаждающей воде;

$$G_6 = \frac{D(h_{2g} - h_3)}{C_6 \Delta t_6} = \frac{3020(2240,3 - 73,52)}{4,187 \cdot 10} = 156 \cdot 10^3 \text{ кг} / \text{ч}$$



## ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

Теплоемкость газов по С.Л.Ривкину

Водяной пар  $\text{H}_2\text{O}$ Оксид углерода  $\text{CO}$  $\mu = 18,014$  $\mu = 28,009$ 

t	$C_p$	$C_v$	$K = \frac{C_p}{C_v}$	t	$C_p$	$C_v$	$K = \frac{C_p}{C_v}$
°C	кДж/кг · К			°C	кДж/кг · К		
0	1,8606	1,3992	1,330	-50	1,0387	0,7419	1,400
25	1,8648	1,4034	1,330	-25	1,0392	0,7423	1,400
50	1,8711	1,4097	1,327	0	1,0392	0,7423	1,400
75	1,8794	1,4181	1,326	25	1,0400	0,7432	1,399
100	1,8899	1,4285	1,323	50	1,0408	0,7440	1,399
125	1,9012	1,4398	1,321	75	1,0425	0,7457	1,398
150	1,9129	1,4515	1,318	100	1,0442	0,7473	1,397
175	1,9255	1,4641	1,315	125	1,0467	0,7498	1,396
200	1,9393	1,4779	1,312	150	1,0505	0,7536	1,394
250	1,9690	1,5076	1,306	175	1,0542	0,7574	1,392
300	2,0000	1,5386	1,300	200	1,0584	0,7616	1,390
350	2,0323	1,5709	1,294	250	1,0689	0,7720	1,384
400	2,0649	1,6035	1,287	300	1,0802	0,7834	1,379
450	2,0984	1,6370	1,281	350	1,0932	0,7963	1,373
500	2,1328	1,6714	1,276	400	1,1062	0,8093	1,367
550	2,1675	1,7061	1,271	450	1,1191	0,8223	1,361
600	2,2027	1,7413	1,265	500	1,1321	0,8353	1,355
650	2,2378	1,7764	1,260	550	1,1451	0,8482	1,350
700	2,2734	1,8120	1,255	600	1,1572	0,8604	1,345
750	2,3090	1,3476	1,250	650	1,1685	0,8717	1,341
800	2,3442	1,8828	1,245	700	1,1794	0,8826	1,336
850	2,3789	1,9175	1,241	750	1,1895	0,8926	1,332
900	2,4133	1,9519	1,236	800	1,1991	0,9022	1,329
950	2,4468	1,9854	1,232	850	1,2079	0,9110	1,326
1000	2,4794	2,0180	1,229	900	1,2163	0,9194	1,323
1050	2,5112	2,0498	1,225	950	1,2238	0,9270	1,320
1100	2,5418	2,0804	1,222	1000	1,2309	0,9341	1,318
1150	2,5715	2,1101	1,219	1050	1,2372	0,9404	1,316
1200	2,6000	2,1386	1,216	1100	1,2435	0,9466	1,314
1250	2,6276	2,1662	1,213	1150	1,2493	0,9525	1,312
1300	2,6540	2,1926	1,211	1200	1,2548	0,9579	1,310
1350	2,6791	2,2177	1,208	1250	1,2598	0,9630	1,308
1400	2,7038	2,2424	1,206	1300	1,2644	0,9676	1,307
1450	2,7269	2,2655	1,204	1350	1,2686	0,9718	1,305
1500	2,7495	2,2881	1,202	1400	1,2728	0,9759	1,304
				1450	1,2766	0,9797	1,303
				1500	1,2803	0,9835	1,302

## Продолжение приложения А

## Теплоемкость газов по С.Л.Ривкину

Кислород  $O_2$ Двуокись углерода  $CO_2$  $\mu = 31,996$  $\mu = 44,0079$ 

t	$C_p$	$C_v$	$K = \frac{C_p}{C_v}$	t	$C_p$	$C_v$	$K = \frac{C_p}{C_v}$
°C	кДж/кг · К			°C	кДж/кг · К		
-50	0,9102	0,6502	1,400	-50	0,7612	0,5723	1,330
-25	0,9115	0,6515	1,399	-25	0,7896	0,6008	1,314
0	0,9136	0,6536	1,398	0	0,8173	0,6284	1,301
25	0,9169	0,6569	1,395	25	0,8436	0,6548	1,288
50	0,9215	0,6615	1,393	50	0,8688	0,6799	1,278
75	0,9265	0,6665	1,390	75	0,8926	0,7038	1,268
100	0,9328	0,6728	1,386	100	0,9156	0,7268	1,260
125	0,9399	0,6799	1,382	125	0,9374	0,7486	1,252
150	0,9473	0,6873	1,378	150	0,9575	0,7687	1,243
175	0,9550	0,6950	1,374	175	0,9764	0,7875	1,240
200	0,9630	0,7030	1,370	200	0,9948	0,8403	1,235
250	0,9780	0,7189	1,361	250	1,0291	0,8403	1,225
300	0,9948	0,7348	1,354	300	1,0601	0,8713	1,217
350	1,0098	0,7498	1,346	350	1,0881	0,8993	1,210
400	1,0237	0,7637	1,340	400	1,1137	0,9249	1,204
450	1,0362	0,7762	1,335	450	1,1371	0,9483	1,199
500	1,0480	0,7880	1,330	500	1,1585	0,9697	1,194
550	1,0588	0,7988	1,325	550	1,1782	0,9893	1,191
600	1,0689	0,8089	1,321	600	1,1962	1,0073	1,188
650	1,0781	0,8181	1,318	650	1,2125	1,0237	1,184
700	1,0860	0,8260	1,314	700	1,2276	1,0387	1,182
750	1,0932	0,8332	1,312	750	1,2414	1,0526	1,180
800	1,0999	0,8399	1,309	800	1,2544	1,0635	1,177
850	1,1062	0,8462	1,307	850	1,2661	1,0773	1,175
900	1,1120	0,8520	1,304	900	1,2766	1,0877	1,174
950	1,1174	0,8574	1,303	950	1,2866	1,0978	1,172
1000	1,1225	0,8625	1,303	1000	1,2598	1,1070	1,171
1050	1,1271	0,8671	1,300	1050	1,3046	1,1158	1,169
1100	1,1317	0,8717	1,298	1100	1,3126	1,1237	1,168
1150	1,1359	0,8759	1,296	1150	1,3197	1,1308	1,167
1200	1,1401	0,8801	1,295	1200	1,3264	1,1376	1,166
1250	1,1438	0,8838	1,294	1250	1,3331	1,1442	1,165
1300	1,1476	0,8876	1,293	1300	1,3389	1,1501	1,164
1350	1,1514	0,8914	1,291	1350	1,3444	1,1556	1,164
1400	1,1551	0,8951	1,290	1400	1,3494	1,1606	1,163
1450	1,1589	0,8989	1,289	1450	1,3544	1,1656	1,162
1500	1,1627	0,9027	1,288	1500	1,3590	1,1702	1,161

Продолжение приложения А

Теплоемкость газов по С.Л.Ривкину

Воздух

Азот

 $\mu = 28,970$  $\mu = 28,013$ 

t	C <sub>p</sub>	C <sub>v</sub>	$\kappa = \frac{C_p}{C_v}$	t	C <sub>p</sub>	C <sub>v</sub>	$\kappa = \frac{C_p}{C_v}$
°C	кДж/кг · К			°C	кДж/кг · К		
-50	1,0019	0,7147	1,402	--50	1,0387	0,7419	1,400
-25	1,0023	0,7151	1,401	-25	1,0387	0,7419	1,400
0	1,0032	0,7159	1,401	0	1,0387	0,7419	1,400
25	1,0040	0,7168	1,400	25	1,0392	0,7423	1,400
50	1,0057	0,7184	1,399	50	1,0400	0,7432	1,399
75	1,0073	0,7201	1,398	75	1,0408	0,7440	1,399
100	1,0098	0,7226	1,397	100	1,0421	0,7444	1,399
125	1,0128	0,7256	1,395	125	1,0438	0,7465	1,398
150	1,0157	0,7285	1,394	150	1,0459	0,7490	1,396
175	1,0199	0,7327	1,392	175	1,0484	0,7515	1,395
200	1,0241	0,7369	1,389	200	1,0517	0,7549	1,393
250	1,0337	0,7465	1,384	250	1,0597	0,7628	1,389
300	1,0446	0,7574	1,379	300	1,0693	0,7725	1,384
350	1,0563	0,7691	1,373	350	1,0798	0,7829	1,379
400	1,0680	0,7808	1,368	400	1,0911	0,7942	1,374
450	1,0798	0,7926	1,362	450	1,1036	0,8068	1,368
500	1,0919	0,8047	1,357	500	1,1158	0,8189	1,362
550	1,1036	0,8164	1,352	550	1,1279	0,8311	1,357
600	1,1149	0,8277	1,347	600	1,1396	1,8428	1,352
650	1,1258	0,8399	1,342	650	1,1510	1,8541	1,348
700	1,1355	0,8487	1,338	700	1,1618	1,8633	1,344
750	1,1455	0,8583	1,334	750	1,1723	1,8754	1,339
800	1,1547	0,8675	1,331	800	1,1824	1,8855	1,335
850	1,1631	0,8759	1,327	850	1,1916	1,8947	1,332
900	1,1706	0,8834	1,325	900	1,1999	1,9031	1,329
950	1,1777	0,8905	1,322	950	1,2079	1,9110	1,326
1000	1,1844	0,8972	1,320	1000	1,2154	1,9186	1,323
1050	1,1911	0,9039	1,317	1050	1,2225	1,9257	1,320
1100	1,1970	0,9028	1,315	1100	1,2292	1,9324	1,318
1150	1,2024	0,9152	1,314	1150	1,2355	1,9387	1,316
1200	1,2079	0,9207	1,312	1200	1,2414	1,9445	1,314
1250	1,2129	0,9257	1,310	1250	1,2468	1,9500	1,312
1300	1,2179	0,9307	1,308	1300	1,2518	1,9550	1,311
1350	1,2225	0,9353	1,307	1350	1,2569	1,9600	1,309
1400	1,2267	0,9395	1,305	1400	1,2615	1,9646	1,308
1450	1,2309	0,9437	1,304	1450	1,2657	1,9688	1,307
1500	1,2347	0,9475	1,303	1500	1,2694	1,9726	1,306

## Продолжение приложения А

Теплоемкость газов по С.Л.Ривкину  
 Водород Н<sub>2</sub>  
 $\mu = 2,0159$

t	C <sub>p</sub>	C <sub>v</sub>	$K = \frac{C_p}{C_v}$	t	C <sub>p</sub>	C <sub>v</sub>	$K = \frac{C_p}{C_v}$
°C	кДж/кг · К			°C	кДж/кг · К		
-50	13,808	8,684	1,425	650	14,855	10,371	1,384
-25	14,030	9,606	1,416	700	14,938	10,814	1,381
0	14,189	10,065	1,410	750	15,026	10,902	1,378
25	14,298	10,174	1,405	800	15,118	10,994	1,375
50	14,365	10,241	1,403	850	15,219	11,095	1,372
75	14,407	10,383	1,401	900	15,320	11,196	1,369
100	14,436	10,312	1,400	950	15,420	11,296	1,365
125	14,457	10,333	1,399	1000	15,525	11,401	1,362
150	14,474	10,350	1,398	1050	15,629	11,505	1,358
175	14,486	10,362	1,398	1100	15,734	11,610	1,355
200	14,499	10,375	1,398	1150	15,833	11,719	1,352
250	14,516	10,392	1,397	1200	15,952	11,828	1,349
300	14,532	10,408	1,396	1250	16,060	11,936	1,346
350	14,553	10,429	1,395	1300	16,165	12,041	1,342
400	14,578	10,454	1,394	1350	16,274	12,150	1,339
450	14,616	10,492	1,393	1400	16,374	12,250	1,337
500	14,658	10,534	1,392	1450	16,479	12,355	1,334
550	14,712	10,588	1,390	1500	16,580	12,456	1,331
600	14,779	10,665	1,387				

Нина Прокопьевна Толкачева  
Валерий Яковлевич Толкачев  
Лидия Деонисовна Ахрямкина

## ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

Учебное пособие

Ответственный редактор доцент Ю.А.Корчук  
Редактор РИЦ С.К.Патюкова

Подписано в печать 08.09.10  
Формат 60 x 84 <sup>1</sup>/16  
Тираж 400 экз.  
Заказ №

Уч. изд. л. 5,5  
Изд. № 4/16

Редакционно-издательский центр СибГТУ  
660049, г. Красноярск, пр. Мира, 82  
Факс (391) 211-97-25  
Телефон (391) 227-69-90

## Перечень ключевых слов

1. Адиабата
2. Барометр
3. Влагосодержание
4. Влажность
5. Водяной пар
6. Диаграмма
7. Изобара
8. Изотерма
9. Изохора
10. Испарение
11. Манометр
12. Параметры состояния
13. Психрометр
14. Расходомер
15. Таблицы водяного пара
16. Теплємкость
17. Теплоноситель
18. Термодинамическая система
19. Термодинамический процесс
20. Термометр
21. Термопара
22. Хладагент

П Р И Л О Ж Е Н И Е Б  
справочное  
Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения  
(по давлению)

Р, кПа	t <sub>н</sub> , °С	v', м³/кг	v'', м³/кг	h', кДж/кг	h'', кДж/кг	г, кДж/кг	S', кДж/кг	S'', кДж/кг·К
10,0	45,83	0,0010102	14,676	191,84	2584,6	2392,6	0,6493	8,1505
11,0	47,71	0,0010111	13,418	199,68	2587,8	2388,1	0,6738	8,1171
12,0	49,45	0,0010119	12,364	206,94	2590,9	2394,0	0,6963	8,0867
13,0	51,06	0,0010126	11,647	213,70	2593,7	2380,0	0,7172	8,0588
14,0	52,58	0,0010133	10,696	220,03	2596,4	2376,4	0,7367	8,0330
15,0	54,00	0,0010140	10,025	225,98	2598,9	2372,9	0,7549	8,0089
16,0	55,34	0,0010147	9,4348	231,60	2601,3	2369,7	0,7721	7,9865
17,0	56,62	0,0010154	8,9128	236,93	2603,5	2366,6	0,7883	7,9655
18,0	57,83	0,0010160	8,4470	242,00	2605,7	2363,7	0,8036	7,9456
19,0	58,98	0,0010166	8,0288	246,83	2607,7	2360,9	0,8182	7,9269
20,0	60,09	0,0010172	7,6515	251,46	2609,6	2358,1	0,8321	7,9092
21,0	61,15	0,0010178	7,3091	255,89	2611,5	2355,6	0,8454	7,8923
22,0	62,16	0,0010183	6,9967	260,14	2613,2	2353,1	0,8581	7,8762
23,0	63,14	0,0010189	6,7110	264,24	2614,9	2350,7	0,8703	7,8609
24,0	64,08	0,0010194	6,4483	268,18	2616,6	2348,4	0,8820	7,8462
25,0	64,99	0,0010199	6,2060	271,99	2618,1	2346,1	0,8932	7,8321
26,0	65,87	0,0010204	5,9819	275,68	2619,7	2344,0	0,9041	7,8186
27,0	66,72	0,0010209	5,7738	279,24	2621,1	2341,9	0,9146	7,8057
28,0	67,55	0,0010214	5,5804	282,70	2622,6	2339,9	0,9248	7,7932
29,0	68,35	0,0010219	5,3998	286,05	2624,0	2337,9	0,9346	7,7611
30,0	69,12	0,0010223	5,2308	289,31	2625,3	2336,0	0,9441	7,7695
32,0	70,62	0,0010232	4,9238	295,55	2627,8	2332,2	0,9623	7,7474
34,0	72,03	0,0010241	4,6518	301,48	2630,3	2328,8	0,9795	7,7266
36,0	73,37	0,0010249	4,4092	307,12	2632,5	2325,4	0,9958	7,7070

## Продолжение приложения Б

## Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения

Р, кПа	t <sub>н</sub> °C	v', м <sup>3</sup> /кг	v'', м <sup>3</sup> /кг	h', кДж/кг	h'', кДж/кг	г кДж/кг	S', кДж/кг	S'', кДж/кг·К
38,0	74,66	0,0010257	4,1915	312,50	2634,7	2322,2	1,0113	7,6886
40,0	75,89	0,0010265	3,9949	317,65	2636,8	2319,2	1,0261	7,6711
42,0	77,06	0,0010272	3,8165	322,60	2638,8	2316,2	1,0403	7,6544
44,0	78,19	0,0010280	3,6537	327,36	2640,7	2313,3	1,0539	7,6386
46,0	79,28	0,0010287	3,5047	331,95	2642,5	2310,5	1,0669	7,6234
48,0	80,33	0,0010294	3,3678	335,35	2644,3	2308,9	1,0794	7,6090
50,0	81,35	0,0010301	3,2415	340,57	2646,0	2305,4	1,0912	7,5951
55,0	83,74	0,0010317	2,9648	350,61	2650,0	2299,4	1,1194	7,5627
60,0	85,95	0,0010333	2,7329	359,93	2653,6	2293,7	1,1454	7,5332
65,0	88,02	0,0010347	2,5357	368,62	2657,0	2288,4	1,1696	7,5061
70,0	89,96	0,0010361	2,3658	376,77	3660,2	2283,4	1,1922	7,4811
75,0	91,78	0,0010375	2,2179	384,45	2663,2	2278,8	1,2132	7,4577
80,0	93,51	0,0010387	2,0879	391,72	2666,0	2274,3	1,2330	7,4360
85,0	95,14	0,0010400	1,9728	398,63	2668,6	2270,0	1,2518	7,4155
90,0	96,71	0,0010412	1,8701	405,21	2671,1	2265,9	1,2696	7,3963
95,0	98,20	0,0010423	1,7779	411,49	2673,5	2262,0	1,2865	7,3781
100,0	99,63	0,0010434	1,6946	417,51	2675,7	2258,2	1,3027	7,3608
110,0	102,32	0,0010455	1,5501	428,84	2680,0	2251,2	1,3330	7,3288
120,0	104,81	0,0010476	1,4289	439,36	2683,8	2244,4	1,3809	7,2996
130,0	107,13	0,0010495	1,3258	449,19	2687,4	2238,2	1,3668	7,2728
140,0	109,32	0,0010513	1,2370	458,42	2690,8	2232,4	1,4109	7,2480
150,0	111,37	0,0010530	1,1597	467,13	2693,9	2226,8	1,4336	7,2248
160,0	113,32	0,0010547	1,0917	475,38	2696,8	2221,4	1,4550	7,2032
170,0	115,17	0,0010563	1,0315	483,22	2699,5	2216,3	1,4944	7,1829
180,0	116,93	0,0010579	0,97775	490,70	2702,1	2211,4	1,4944	7,1638



## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по температурам)

t, С	P <sub>н</sub> , МПа	v', м³/кг	v'', м³/кг	ρ, кг/м³	h', кДж/кг	h'', кДж/кг	г кДж/кг	S', кДж/кг·К	S'', кДж/кг·К
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,0006108	0,0010002	206,3	0,004847	0,000	2500,8	2500,8	0,	9,1644
5	0,0008718	0,0010001	147,2	0,006793	21,06	2510,0	2489,0	0,0762	9,0242
10	0,0012271	0,0010004	106,42	0,009398	42,04	2519,2	2477,3	0,1511	8,8995
15	0,001704	0,0010010	77,97	0,01282	62,97	2528,4	2465,4	0,2244	8,7806
20	0,002337	0,0010018	57,84	0,01729	83,90	2537,2	2453,4	0,2964	8,6663
25	0,003167	0,0010030	43,40	0,02304	104,80	2546,4	2441,7	0,3672	8,5570
30	0,004241	0,0010044	32,93	0,03036	125,69	2555,6	2430,0	0,4367	8,4523
35	0,005622	0,0010060	25,25	0,03960	146,58	2564,8	2418,3	0,5049	8,3518
40	0,007375	0,0010079	19,55	0,05115	167,51	2573,6	2406,1	0,5723	8,2560
45	0,009582	0,0010099	15,28	0,06545	188,41	2582,4	2394,0	0,6385	8,1638
50	0,012335	0,0010121	12,05	0,08302	209,30	2591,6	2382,3	0,7038	8,0751
55	0,015741	0,0010145	9,578	0,1044	230,19	2600,4	2370,1	0,7679	7,9901
60	0,01992	0,0010171	7,678	0,1302	251,12	2609,2	2358,0	0,8311	7,9084
65	0,02501	0,0010199	6,201	0,1613	272,06	2617,6	2345,4	0,8935	7,8297
70	0,03116	0,0010228	5,045	0,1982	292,99	2626,4	2333,3	0,9550	7,7544
80	0,04736	0,0010290	3,409	0,2933	334,94	2643,1	2308,2	1,0752	7,6116
90	0,07011	0,0010359	2,361	0,4235	376,98	2659,5	2282,5	1,1924	7,4785
100	0,10132	0,0010435	1,673	0,5977	419,10	2675,8	2256,7	1,3071	7,3545
110	0,14327	0,0010515	0,210	0,8263	416,34	2691,3	2230,0	1,4185	7,2386
120	0,19854	0,0010603	0,8917	1,122	503,7	2706,3	2202,7	1,5278	7,1289
130	0,27011	0,0010697	0,6683	1,496	546,4	2720,6	2174,2	1,6345	7,0271
140	0,3614	0,0010798	0,5087	1,966	589,1	2734,0	2144,9	1,7392	6,9304
150	0,4760	0,0010906	0,3926	2,547	632,2	2746,5	2114,3	1,8418	6,8383
160	0,6180	0,0011021	0,3068	3,259	675,3	2757,8	2082,5	1,9427	6,7508
170	0,7920	0,0011144	0,2426	4,122	719,3	2768,7	2049,4	2,0419	6,6666
180	1,0027	0,0011275	0,1939	5,157	763,3	2778,4	2015,1	2,1395	6,5858
190	1,2553	0,0011415	0,1564	6,395	807,6	2786,3	1978,7	2,2358	6,5075
200	1,5550	0,0011565	0,1272	7,863	852,4	2793,0	1940,6	2,3308	6,4318

## Продолжение приложения В

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
210	1,9080	0,0011726	0,1044	9,578	897,6	2798,0	1900,4	2,4246	6,3577
220	2,3202	0,0011900	0,08606	11,62	943,7	2801,4	1857,7	2,5179	6,2848
230	2,7979	0,0012087	0,07147	13,99	990,2	2803,1	1812,7	2,6101	6,2132
240	3,3480	0,0012291	0,05967	16,76	1037,5	2803,1	1765,6	2,7022	6,1425
250	3,978	0,0012512	0,05005	19,98	1086,1	2801,0	1714,9	2,7934	6,0721
260	4,694	0,0012755	0,04215	23,72	1135,0	2796,4	1661,3	2,8851	6,0014
270	5,505	0,0013023	0,03560	28,09	1185,3	2789,7	1604,4	2,9764	5,9298
280	6,419	0,0013321	0,03013	33,19	1236,8	2779,6	1542,8	3,6685	5,8573
290	7,445	0,0013655	0,02553	39,17	1290,0	2766,2	1476,3	3,1610	5,7824
300	8,592	0,0014036	0,02164	46,21	1344,8	2749,1	1404,3	3,2548	5,7049
310	9,869	0,001447	0,01831	54,61	1402,2	2727,3	1325,1	3,3507	5,6233
320	11,280	0,001499	0,01545	64,74	1462,0	2699,6	1237,6	3,4495	5,5354
330	12,864	0,001562	0,01297	77,09	1526,1	2665,7	1139,6	3,5521	5,4412
340	14,608	0,001639	0,01078	92,77	1594,8	2621,8	1027,0	3,6605	5,3361
350	16,537	0,001741	0,008805	113,6	1671,4	2564,4	893,0	3,7786	5,2117
360	18,674	0,001894	0,006943	144,1	1761,4	2481,1	719,7	3,9163	5,0530
370	21,053	0,00222	0,00493	202,4	1892,4	2330,8	438,4	4,1135	4,7951
374	22,087	0,00280	0,00347	288,0	2031,9	2147,0	114,7	4,3258	4,5029