

**Министерство образования Республики Беларусь**

**Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»**

**Кафедра «Промышленная теплоэнергетика и экология»**

**А. В. Овсянник, А. А. Нижников, М. Н. Новиков**

## **ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА**

### **ПРАКТИКУМ**

**по одноименному курсу**

**для студентов специальностей**

**1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика»**

**и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация**

**энергооборудования организаций»**

**дневной и заочной форм обучения**

**Электронный аналог печатного издания**

**Гомель 2015**

УДК 621.1.016.7(075.8)  
ББК 31.31я73  
О-34

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом  
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 3 от 25.11.2014 г.)*

Рецензент: доц. каф. «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого  
канд. техн. наук, доц. *О. Г. Широков*

- О-34 **Овсянник, А. В.** Техническая термодинамика : практикум по одноим. курсу для студентов специальностей 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика» и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования организаций» днев. и заоч. форм обучения / А. В. Овсянник, А. А. Нижников, М. Н. Новиков. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2016. – 31 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-535-286-1.

Предназначен для теоретической и практической подготовки по технической термодинамике. Поможет студентам овладеть теоретическими и практическими навыками в области термодинамических процессов идеальных газов, смеси идеальных газов. Даны методика расчетов, диаграммы, примеры решения задач, приложение с вариантами заданий.

Для студентов энергетических специальностей дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.1.016.7(075.8)  
ББК 31.31я73

ISBN 978-985-535-286-1

© Овсянник А. В., Нижников А. А.,  
Новиков М. Н., 2016  
© Учреждение образования «Гомельский  
государственный технический университет  
имени П. О. Сухого», 2016

# 1. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССОВ

При изучении термодинамических процессов идеальных газов должны быть решены основные задачи:

1. Определение уравнения процесса  $f(p, v) = 0$ , устанавливающего закономерность изменения состояния рабочего тела в процессе.

2. Выявление особенностей преобразования подведенной к рабочему телу теплоты, распределение ее между изменением внутренней энергии и совершаемой рабочим телом внешней работой. Основой решения задачи является уравнение первого начала термодинамики, записанное при соблюдении условий, присущих рассматриваемому процессу. Совокупность уравнений процесса и состояния идеального газа дает возможность получать соотношения различных параметров газа в виде функциональных зависимостей вида:  $p = f(v)$ ;  $s = f(T)$  и др.

Основными процессами являются: изохорный, протекающий при постоянном объеме; изобарный, протекающий при постоянном давлении; изотермический, происходящий при постоянной температуре; адиабатный – процесс, при котором отсутствует теплообмен с окружающей средой, и политропный, удовлетворяющий уравнению  $pv^n = \text{const}$ .

*Политропный процесс*

Уравнение политропы:

$$pv^{\frac{c-c_p}{c-c_v}} = pv^n = \text{const}, \quad (1.1)$$

где  $n = \frac{c - c_p}{c - c_v}$  – показатель политропы.

Уравнение показывает, что политропным процессом является такой термодинамический процесс изменения параметров состояния рабочего тела, при котором в течение всего процесса показатель политропы  $n$  может принимать любое численное значение в пределах от  $-\infty$  до  $+\infty$ , но для данного процесса он является величиной постоянной.

Выражения, устанавливающие связь между параметрами состояния  $p$ ,  $v$  и  $T$  в любых двух точках на политропе:

$$p_2 / p_1 = (v_1 / v_2)^n ; \quad (1.2)$$

$$T_2 / T_1 = (v_1 / v_2)^{n-1} ; \quad (1.3)$$

$$T_2 / T_1 = (p_2 / p_1)^{(n-1)/n} . \quad (1.4)$$

Все уравнения, полученные для адиабатного процесса, можно использовать для политропного процесса, заменяя в выражениях  $k$  на  $n$ .

Работа расширения совершается за счет уменьшения внутренней энергии и вычисляется как

$$L_p = \frac{1}{n-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2) . \quad (1.5)$$

Изменение внутренней энергии:

$$\Delta U = m C_v (T_2 - T_1) . \quad (1.6)$$

Количество теплоты:

$$Q = \Delta U + L_p . \quad (1.7)$$

*Адиабатный процесс*

Процесс, происходящий без теплообмена с окружающей средой, т. е.  $dq = 0$ , представлен на рис. 1.1.

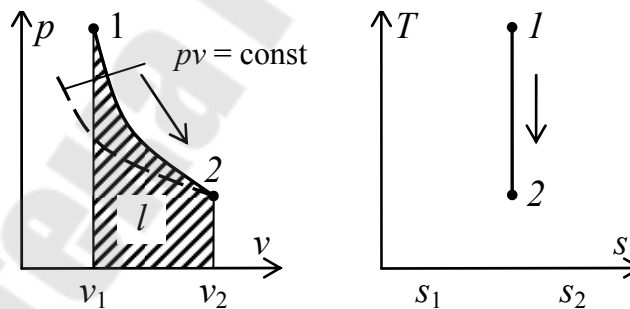


Рис. 1.1. Адиабатный процесс в  $p$ - $v$  и  $T$ - $s$ -диаграммах

Уравнение адиабатного процесса:

$$p_1 v_1^k = p_2 v_2^k . \quad (1.8)$$

Это и есть уравнение адиабаты идеального газа при постоянном отношении теплоемкостей, т. е.  $k = c_p / c_v$  – показатель адиабаты.

Уравнения адиабатного процесса в форме, выражающей зависимость температуры от объема или давления, будут:

$$T_2 / T_1 = (v_1 / v_2)^{k-1}; \quad (1.9)$$

$$T_2 / T_1 = (p_2 / p_1)^{(k-1)/k}. \quad (1.10)$$

Работа расширения совершается за счет уменьшения внутренней энергии и вычисляется как

$$L_p = -\Delta U = c_v (T_1 - T_2) = \frac{R}{k-1} (T_1 - T_2). \quad (1.11)$$

Так как  $p_1 v_1 = RT_1$  и  $p_2 v_2 = RT_2$ , то

$$L_p = \frac{1}{k-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2). \quad (1.12)$$

Изменение внутренней энергии:

$$\Delta U = m C_v (T_2 - T_1). \quad (1.13)$$

Поскольку при адиабатном процессе  $\Delta Q = 0$ , энтропия рабочего тела не изменяется.

*Изотермический процесс*

При изотермическом процессе выполняется условие  $dT = 0$  или  $T = \text{const}$  (рис. 1.2).

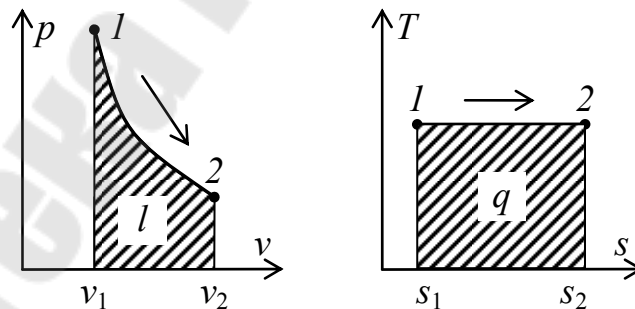


Рис. 1.2. Изотермический процесс в  $p$ - $v$  и  $T$ - $s$ -диаграммах

Уравнение процесса:

$$pv = RT = \text{const}, \quad (1.14)$$

или

$$p_2 / p_1 = v_1 / v_2, \quad (1.15)$$

т. е. давление и объем обратно пропорциональны друг другу, так что при изотермическом сжатии давление газа возрастает, а при расширении – падает (закон Бойля–Мариотта).

Работа изменения объема:

$$L_p = \int_{v_1}^{v_2} p dv = \int_{v_1}^{v_2} \frac{RT dv}{v} = RT \ln(v_2 / v_1) = p_1 V_1 \ln(p_1 / p_2). \quad (1.16)$$

Вся теплота, сообщаемая газу в изотермическом процессе, целиком идет на совершение работы:

$$Q = L_p = L_{\text{п}}. \quad (1.17)$$

При изотермическом сжатии от газа отводится теплота в количестве, равном затраченной на сжатие работе.

## 2. СМЕСИ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ. ЗАКОН ДАЛЬТОНА

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

Массовая доля определяется отношением массы отдельного газа, входящего в смесь, к массе всей смеси:

$$g_i = \frac{m_i}{m_{\text{см}}}. \quad (2.1)$$

Объемной долей газа называют отношение приведенного объема каждого компонента, входящего в смесь, к объему всей смеси:

$$r_i = \frac{V_i}{V_{\text{см}}}. \quad (2.2)$$

Кажущаяся молекулярная масса смеси:

$$\mu_{\text{см}} = \sum r_i \mu_i. \quad (2.3)$$

Газовую постоянную смеси газов ( $R_{\text{см}}$ ) можно выразить либо через газовые постоянные отдельных компонентов, входящих в смесь, либо через кажущуюся молекулярную массу смеси:

$$R_{\text{см}} = \sum g_i R_i, \quad (2.4)$$

или

$$R_{\text{см}} = \frac{R_{\mu}}{\mu_{\text{см}}}. \quad (2.5)$$

Связь между давлением газовой смеси и парциальными давлениями отдельных компонентов, входящих в смесь, описывается *законом Дальтона*:

$$p_{\text{см}} = \sum p_i. \quad (2.6)$$

Парциальные давления отдельных компонентов можно определить, используя следующее уравнение:

$$p_i = r_i p_{\text{см}}. \quad (2.7)$$

Теплоемкость газовой смеси определяется на основании следующих формул:

– массовая теплоемкость смеси:

$$c_{\text{см}} = \sum g_i (c_v)_i = \sum \frac{g_i R_i}{k-1}, \quad (2.8)$$

– объемная теплоемкость смеси:

$$c'_{\text{см}} = \sum \frac{\mu_i (c_v)_i}{22,4}, \quad (2.9)$$

– мольная теплоемкость смеси:

$$\mu c_{\text{см}} = \sum r_i \mu_i (c_v)_i. \quad (2.10)$$



### 3. РАСЧЕТ РАСПОЛАГАЕМОЙ РАБОТЫ, СКОРОСТИ ИСТЕЧЕНИЯ И РАСХОДА ГАЗА

Рассмотрим истечение газа из сосуда неограниченной емкости. В этом случае параметры на входе в сопло равны параметрам торможения  $p_1 = p^*$ ,  $T_1 = T^*$ ,  $v = v^*$ , а скорость  $w_1 = 0$ . Скорость на выходе из сопла с площадью поперечного сечения  $f_2$  равна скорости истечения  $w_2 = w$ , а давление газа на выходе из сопла – давлению окружающей среды  $p_2$ .

*Расчет располагаемой работы*

Располагаемая работа при адиабатном течении газа в сопле идет на увеличение кинетической энергии потока газа:

$$l_0 = \int_{p_1}^{p_2} -v dp = \int_{p_2}^{p_1} v dp = \frac{w_2^2}{2} - \frac{w_1^2}{2} = h_1 - h_2. \quad (3.1)$$

*Расчет скорости истечения газа*

Скорость истечения газа определяется из выражения  $\frac{w_2^2}{2} - \frac{w_1^2}{2} = l_0$ . Тогда  $w_2 = \sqrt{2l_0 + w_1^2}$ , при  $w_1 = 0$ ,  $w = w_2 = \sqrt{2l_0}$ . Тогда имеем:

$$w = \sqrt{\frac{2k}{k-1} p_1 v_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} = \sqrt{\frac{2k}{k-1} R T_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}. \quad (3.2)$$

Скорость истечения газа зависит от состояния газа на входе в сопло и глубины его расширения, т. е. от отношения давлений газа  $p_2/p_1$ .

Если выразить располагаемую работу через изменение энтальпий газа, то получим:

$$w = \sqrt{2l_0} = \sqrt{2(h_1 - h_2)}. \quad (3.3)$$

Таким образом, скорость истечения газа зависит от значений энтальпий газа перед соплом и на выходе из него.

Максимальная скорость истечения газа будет при его истечении в вакуум, т. е. при  $p_2 = 0$ :

$$w_{\max} = \sqrt{\frac{2k}{k-1} p_1 v_1} = \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT_1}. \quad (3.4)$$

Скорость истечения несжимаемой жидкости определяется по следующей формуле:

$$w = \sqrt{2l_0} = \sqrt{2 \frac{p_1 - p_2}{\rho}}. \quad (3.5)$$

*Расчет геометрических характеристик сопла*

Минимальная площадь проходного сечения сопла:

$$f_{\min} = \frac{v_k G_{\max}}{w_k}. \quad (3.6)$$

Площадь выходного сечения сопла  $f_2$  определяется как:

$$f_2 = \frac{v_2 G_{\max}}{w}. \quad (3.7)$$

Длина расширяющейся части сопла:

$$l = \frac{d - d_{\min}}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}, \quad (3.8)$$

где  $d$  и  $d_{\min}$  – определяется из площади проходного сечения и площади минимального сечения сопла, соответственно.

## 4. ДИАГРАММА $h$ - $s$ ВОДЯНОГО ПАРА

Диаграмма  $h$ - $s$  водяного пара предназначена для анализа и неавтоматизированного расчета процессов воды и водяного пара. На паровой диаграмме  $h$ - $s$  критическая точка «К» сдвинута влево и вниз по отношению к вершине, так как энтальпия  $h_k$  в критической точке не является максимальной величиной (рис. 4.1). Так, для воды  $h_k = 2089$  кДж/кг, а  $h_{\max} = 2847$  кДж/кг при давлении  $p = 30$ – $40$  ата.

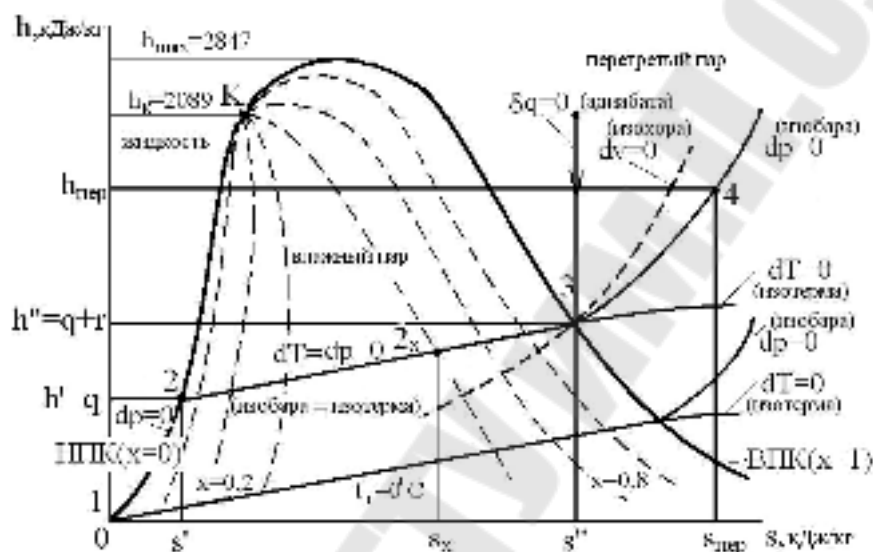


Рис. 4.1. Диаграмма  $h$ - $s$  водяного пара

При построении диаграммы  $h$ - $s$  принимается, что при температуре  $t_0 = 0$  °C величины энтальпии, внутренней энергии и энтропии равны нулю, т. е.  $h_0 = 0$ ,  $u_0 = 0$  и  $s_0 = 0$ .

Процесс 1–2 – подогрев жидкости при  $p = \text{const}$ : теплота жидкости  $h' = u' = q = c_{\text{вод}} t_s$ , энтропия  $s' = c_{\text{вод}} \ln \frac{T_s}{273}$ .

Процесс 2–3 – парообразование (прямая наклонная линия в области влажного пара):

$$h_x = q + rx; s_x = c_{\text{вод}} \ln \frac{T_s}{273} + \frac{r}{T_s} x. \quad (4.1)$$

Для сухого насыщенного пара (точка 3):

$$h'' = q + r; s'' = c_{\text{вод}} \ln \frac{T_s}{273} + \frac{r}{T_s}. \quad (4.2)$$

Для перегретого пара (точка 4):

$$h_{\text{пер}} = q + r + c_{pm} (T_{\text{пер}} - T_s); \quad s = c_{\text{вод}} \ln \frac{T_s}{273} + \frac{r}{T_s} + c_{pm} \ln \frac{T_{\text{пер}}}{T_s}. \quad (4.3)$$

Положение точек на диаграмме  $h$ - $s$  определяется заданием следующих параметров:

- 1) для влажного пара заданием давления ( $p$ ) и степени сухости ( $x$ );
- 2) для сухого насыщенного пара ( $x = 1$ ) заданием давления ( $p$ );
- 3) для перегретого пара заданием давления ( $p$ ) и температуры ( $T$ ).

По положению точки на диаграмме  $h$ - $s$  можно определить все параметры этого состояния, рассчитать теплоту и внешнюю работу любого процесса. В диаграмме  $h$ - $s$  теплоты выражаются прямыми линиями. Поэтому расчет паровых процессов в энергетической части более удобно проводить по диаграмме  $h$ - $s$ , чем по диаграмме  $T$ - $s$ , где теплоты выражаются площадями под кривой процесса, которые надо измерять планиметром.

Расчет теплоты, работы и изменений внутренней энергии с помощью паровой диаграммы  $h$ - $s$  проводится в следующем порядке:

- по условию задания наносят на диаграмму график процесса 1–2;
- по положению крайних точек процесса 1–2 определяют все параметры пара в начале ( $p_1, T_1, v_1, h_1, s_1$ ) и в конце ( $p_2, T_2, v_2, h_2, s_2$ ) процесса;
- по общей для всех процессов формуле определяется изменение внутренней энергии пара в процессе 1–2:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = (h_2 - h_1) - (p_2 v_2 - p_1 v_1). \quad (4.4)$$

Для пара в изотермическом процессе величина  $\Delta u \neq 0$  и  $\Delta h \neq 0$  (как известно, для идеального газа в процессе  $T = \text{const}$   $\Delta u = 0$  и  $\Delta h = 0$ ). Это связано с тем, что в процессе парообразования внутренняя теплота испарения ( $\Delta u = u'' - u'$ ) идет на преодоление внутреннего сцепления между молекулами (работу дисгрегации), которая зависит как от температуры, так и от давления;

– определяется теплота, сообщенная пару в процессе 1–2:

- 1) при  $v = \text{const}$ :  $q_v = \Delta u = \Delta h - v(p_2 - p_1)$ ;
- 2) при  $p = \text{const}$ :  $q_p = h_2 - h_1 = \Delta h$ ;
- 3) при  $T = \text{const}$ :  $q = T(s_2 - s_1) = T\Delta s$ ;
- 4) при адиабатном процессе:  $\delta q = 0$  и  $q = 0$ ;
- 5) определяется внешняя работа пара по общему выражению 1-го закона термодинамики:  $l = q - \Delta u$ .

## 5. ДИАГРАММА $h-d$ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА

В воздушной среде производственных и общественных помещений происходят изменения тепловлажностного состояния, которые удобно проследить и рассчитывать с помощью  $h-d$ -диаграммы.

Каждая точка в поле диаграммы соответствует определенному тепловлажностному состоянию воздуха. Положение точки определяется любыми двумя из пяти параметров состояния. Остальные три могут быть определены по  $h-d$ -диаграмме как производные. Диаграмма удобна не только для определения параметров состояния воздуха, но и для построения изменений его состояния при нагреве, охлаждении, увлажнении, осушке, смешении и сочетании этих процессов в произвольной последовательности.

На  $h-d$ -диаграмме любая точка обозначает вполне определенное физическое состояние воздуха. Если точка 1 (рис. 5.1) соответствует начальному состоянию воздуха, а точка 2 его измененному состоянию, то линия, соединяющая эти две точки, характеризует процесс изменения состояния воздуха и носит название луча процесса. Направление луча процесса определяют угловым коэффициентом  $\varepsilon$ , который равен следующему отношению:

$$\varepsilon = \frac{h_1 - h_2}{d_1 - d_2} 10^3 = \frac{\Delta h}{\Delta d} 10^3. \quad (5.1)$$

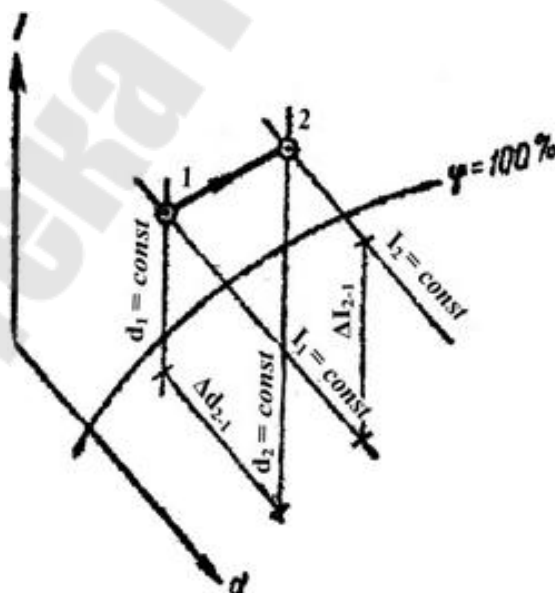


Рис. 5.1. К определению направления луча процесса изменения состояния воздуха в  $h-d$ -диаграмме

Коэффициент  $\varepsilon$  измеряется в кДж/кг влаги. Этот параметр называют также тепловлажностным отношением, поскольку он показывает величину приращения количества теплоты на 1 кг полученной (или отданной) воздухом влаги. Если начальные параметры воздуха различны, а значения  $\varepsilon$  одинаковы, то линии, характеризующие изменение состояния воздуха, параллельны друг другу.

Выражение (5.1) можно изобразить, умножив числитель и знаменатель на расход воздуха  $G$ , кг/ч, участвующего в процессе:

$$\varepsilon = \frac{(h_1 - h_2)G}{(d_1 - d_2)G} 1000 = \frac{Q_{\text{п}}}{W_{\text{изм}}}, \quad (5.2)$$

где  $Q_{\text{п}}$  – поток полной теплоты, обмененной в процессе изменения состояния воздуха, кДж/ч;  $W_{\text{изм}}$  – расход влаги, обмененной в процессе изменения состояния воздуха, кг/ч. Иногда величину  $\varepsilon = \left(\frac{\Delta h}{\Delta d}\right)1000$  называют угловым масштабом.

Прямые, выражающие изменения состояния воздушно-паровой смеси, имеющие одинаковые значения углового коэффициента, параллельны друг другу. Это дает возможность построить на  $h-d$ -диаграмме угловой масштаб, облегчающий практическое нанесение лучей. Линии луча процесса проводят из начала координат  $h-d$ -диаграммы, т. е. из точки  $h = 0$  и  $d = 0$ . Соединяя начало координат с продолжением соответствующего значения углового масштаба, нанесенного на полях, получаем луч, характеризующий направление процесса для данного значения тепловлажностного отношения.

Практическое использование масштаба сводится к перепаду масштабного луча с соответствующим значением углового коэффициента с таким расчетом, чтобы он проходил через заданную точку, которой может являться точка, определяющая начальное или конечное состояние воздуха в зависимости от условий задачи.

## 6. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

### ЗАДАЧА № 1

Воздух с начальным объемом  $V_1 = 0,1 \text{ м}^3$ , начальным давлением  $p_1 = 13,3 \text{ МПа}$  и начальной температурой  $t_1 = 13 \text{ °С}$  находится в баллоне. После открытия вентиля воздух истекает в окружающую среду с давлением  $p_2 = 0,12 \text{ МПа}$  политропно с показателем политропы  $n = 1,3$ . Определить массу воздуха, удельный объем и температуру в конце расширения, величину полезной работы, изменение внутренней энергии и количество отведенного или подведенного тепла. Решить задачу в случае, если расширение происходит изотермически и адиабатно.

#### *Решение*

Переведем единицы измерения в систему СИ:

$$T_1 = t_1 + 273,15 = 286,5 \text{ К.}$$

Из уравнения Менделеева–Клапейрона находим массу:

$$m = \frac{p_1 V_1}{RT_1} = 16,2 \text{ кг.}$$

*Политропный процесс*

Уравнение политропного процесса:

$$p_1 V_1^n = p_2 V_2^n.$$

Определим параметры в конце расширения:

$$V_2 = V_1 \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^n = 3,74 \text{ м}^3;$$

$$T_2 = \frac{p_2 V_2}{mR} = 96,6 \text{ К,}$$

где  $R$  для воздуха –  $287 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ .

Найдем удельный объем в конце расширения:

$$v_2 = \frac{V_2}{m} = 0,231 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Определим работу расширения, работу проталкивания и полезную работу:

$$L_p = \frac{1}{n-1}(p_1V_1 - p_2V_2) = 2,937 \text{ МДж};$$

$$L_3 = p_2(V_2 - V_1) = 0,437 \text{ МДж};$$

$$L_{\text{п}} = L_p - L_3 = 2,501 \text{ МДж}.$$

Найдем изменение внутренней энергии:

$$\Delta U = mC_v(T_2 - T_1) = -2,205 \text{ МДж},$$

где  $C_v = 718 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$  – изохорная теплоемкость воздуха.

Количество теплоты:

$$Q = \Delta U + L_p = 0,733 \text{ МДж}.$$

*Адиабатный процесс*

Уравнение адиабатного процесса:

$$p_1V_1^k = p_2V_2^k.$$

Определим параметры в конце расширения:

$$V_2 = V_1 \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^k = 2,89 \text{ м}^3;$$

$$T_2 = \frac{p_2V_2}{mR} = 74,54 \text{ К}.$$

Найдем удельный объем в конце расширения:

$$v_2 = \frac{V_2}{m} = 0,178 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Определим работу расширения, работу проталкивания и полезную работу:

$$L_p = \frac{1}{k-1}(p_1V_1 - p_2V_2) = 2,459 \text{ МДж};$$

$$L_3 = p_2(V_2 - V_1) = 0,335 \text{ МДж};$$



$$L_{\text{п}} = L_{\text{р}} - L_3 = 2,124 \text{ МДж.}$$

Найдем изменение внутренней энергии:

$$\Delta U = mC_v(T_2 - T_1) = -2,459 \text{ МДж.}$$

Количество теплоты:

$$Q = \Delta U + L_{\text{р}} = 0 \text{ МДж.}$$

*Изотермический процесс*

Уравнение изотермического процесса:

$$p_1V_1 = p_2V_2.$$

Определим параметры в конце расширения:

$$V_2 = V_1 \frac{p_1}{p_2}.$$

$$T_2 = T_1 = 286,15 \text{ К.}$$

Найдем удельный объем в конце расширения:

$$v_2 = \frac{V_2}{m} = 0,684 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Определим работу расширения, работу проталкивания и полезную работу:

$$L_{\text{р}} = p_1V_1 \ln \frac{p_1}{p_2} = 6,262 \text{ МДж};$$

$$L_3 = p_2(V_2 - V_1) = 1,318 \text{ МДж};$$

$$L_{\text{п}} = L_{\text{р}} - L_3 = 4,944 \text{ МДж.}$$

Найдем изменение внутренней энергии:

$$\Delta U = 0 \text{ МДж.}$$

Количество теплоты:

$$Q = L_{\text{р}} = 6,262 \text{ МДж.}$$

## ЗАДАЧА № 2

Объемный состав газовой смеси следующий:  $\text{CO}_2 = 5 \%$ ;  $\text{N}_2 = 20 \%$ . Определить объемный состав Ar, массовый состав газа, кажущуюся молекулярную массу и газовую постоянную, парциальные давления составляющих смеси, а также массовую, объемную и мольную теплоемкость смеси при  $p = 750$  мм рт. ст.

### Решение

Определим количество аргона в смеси:

$$\text{Ar} = 100 - \text{CO}_2 - \text{N}_2 = 75 \%$$

Определим объемные доли газов на основании исходных данных ( $\text{CO}_2 = r_1$ ;  $\text{N}_2 = r_2$ ;  $\text{Ar} = r_3$ ):

$$r_1 = 0,05; r_2 = 0,2; r_3 = 0,75.$$

Найдем парциальные давления газов, составляющих смесь:

$$p_1 = r_1 \cdot p = 38 \text{ мм рт. ст.}; p_2 = 152 \text{ мм рт. ст.}; p_3 = 570 \text{ мм рт. ст.}$$

Найдем молярные массы газов, составляющих смесь:

$$\mu_1 = 44 \text{ г/моль}; \mu_2 = 28 \text{ г/моль}; \mu_3 = 18 \text{ г/моль.}$$

Определим молекулярную массу смеси:

$$\mu_{\text{см}} = \sum r_i \mu_i = 21,3 \text{ г/моль.}$$

Определим массовые доли газов:

$$g_1 = (r_1 \mu_1) / \mu_{\text{см}} = 0,103; g_2 = 0,263; g_3 = 0,634.$$

Найдем газовую постоянную компонентов и смеси:

$$R_1 = (R / \mu_1) = 188,95 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}; R_2 = 296,93 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)};$$

$$R_3 = 461,89 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)},$$

где  $R = 8314 \text{ Дж/(кмоль} \cdot \text{K)}$  – универсальная газовая постоянная:

$$R_{\text{см}} = (R / \mu_{\text{см}}) = 390,33 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}.$$

Определим показатели адиабаты для компонентов газовой смеси:

$$k_1 = 1,33; k_2 = 1,4; k_3 = 1,67.$$

Определим массовые теплоемкости компонентов и смеси:

$$C_{v_1} = R_1 / (k_1 - 1) = 629,85 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); C_{v_2} = 742,32 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$C_{v_3} = 689,38 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$C_{v_{\text{см}}} = C_{v_1} g_1 + C_{v_2} g_2 + C_{v_3} g_3 = 697,15 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Определим мольную теплоемкость компонентов и смеси:

$$\mu C_{v_1} = \mu_1 C_{v_1} = 27,71 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}); \mu C_{v_2} = 20,79 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К});$$

$$\mu C_{v_3} = 12,41 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}); \mu C_{v_{\text{см}}} = \mu_{\text{см}} C_{v_{\text{см}}} = 14,85 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}).$$

Определим объемную теплоемкость компонентов и смеси:

$$C'_{v_1} = \mu C_{v_1} / (22,4 \cdot 10^{-3}) = 1237 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}); C'_{v_2} = 927,9 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К});$$

$$C'_{v_3} = 553,9 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К});$$

$$C'_{v_1} = \mu C_{v_{\text{см}}} / (22,4 \cdot 10^{-3}) = 662,92 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

### ЗАДАЧА № 3

Воздух при давлении  $p_1 = 1,1$  МПа и температуре  $t_1 = 295$  °С вытекает из расширяющегося сопла (угол конусности расширяющейся части сопла  $\alpha = 7^\circ$ ) в среду с давлением  $p_2 = 0,1$  МПа. Расход воздуха:  $M = 3$  кг/с. Определить размеры сопла. Расширение воздуха в сопле считать адиабатным.

#### Решение

Определим удельный объем воздуха в начале процесса:

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287(273,15 + 295)}{1,1 \cdot 10^6} = 0,148 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Критическое отношение давлений для воздуха:

$$\left( \frac{p_{\text{кр}}}{p_1} \right) = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = 0,528.$$

Следовательно, критическое давление, устанавливающееся в минимальном сечении сопла:

$$p_{кр} = 0,528 \cdot p_1 = 0,528 \cdot 1,1 \cdot 10^6 = 0,581 \text{ МПа.}$$

Удельный объем воздуха в минимальном сечении  $v_{кр}$  находим из соотношения адиабатного процесса:

$$v_{кр} = v_1 \left( \frac{p_1}{p_{кр}} \right)^{\frac{1}{k}} = 0,148 \left( \frac{1,1 \cdot 10^6}{0,581 \cdot 10^6} \right)^{\frac{1}{1,4}} = 0,234 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Теоретическая скорость воздуха в минимальном сечении:

$$c_{кр} = 1,08 \sqrt{RT_1} = 1,08 \sqrt{287 \cdot 568,15} = 436,127 \text{ м/с.}$$

Площадь минимального сечения сопла:

$$f_{\min} = \frac{M}{c_{кр}} v_{кр} = \frac{3 \cdot 0,234}{436,127} = 1,609 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Принимая сечение сопла круглым, находим диаметр наиболее узкой части:

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{f_{\min}}{\pi/4}} = \sqrt{\frac{1,609 \cdot 10^{-3}}{0,785}} = 0,045 \text{ м.}$$

Удельный объем воздуха в выходном сечении:

$$v_2 = v_1 \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{k}} = 0,148 \left( \frac{1,1 \cdot 10^6}{0,1 \cdot 10^6} \right)^{\frac{1}{1,4}} = 0,822 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Скорость истечения воздуха из сопла:

$$c = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1} p_1 v_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,4}{0,4} \cdot 1,1 \cdot 10^6 \cdot 0,148 \left[ 1 - \left( \frac{0,1 \cdot 10^6}{1,1 \cdot 10^6} \right)^{\frac{0,4}{1,4}} \right]} = 752,398 \text{ м/с.}$$

Площадь выходного сечения сопла:

$$f = \frac{M v_2}{c} = \frac{3 \cdot 0,822}{752,398} = 3,277 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Диаметр выходного сечения сопла:

$$d = \sqrt{\frac{4f}{\pi}} = \sqrt{\frac{3,277 \cdot 10^{-3}}{0,785}} = 0,065 \text{ м.}$$

Длина расширяющейся части:

$$l = \frac{d - d_{\min}}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} = \frac{0,065 - 0,045}{2 \operatorname{tg}(3,5^\circ)} = 0,158 \text{ м.}$$

#### ЗАДАЧА № 4

В закрытом сосуде содержится сухой насыщенный водяной пар объемом  $V = 1,2 \text{ м}^3$  при давлении  $p_1 = 1 \text{ Мпа}$ . Определить давление, степень сухость пара, энтропию, энтальпию, внутреннюю энергию и количество отданного им тепла, если он охладится до температуры  $t_2 = 60 \text{ }^\circ\text{С}$ .

#### Решение

По таблицам водяного пара по давлению определяем удельный объем сухого насыщенного пара, энтальпию воды, теплоту парообразования, энтропию:

$$v_1'' = 0,19435 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$h_1' = 181,3 \text{ ккал/кг} = 181,3 \cdot 4,187 = 759,1 \text{ кДж/кг.}$$

Из таблиц воды и водяного пара по температуре  $t_2$  определяем следующие параметры:

$$r = 2358 \text{ кДж/кг};$$

$$s_2' = 0,5088 \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot \text{К}) = 2,13 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$s_2'' = 1,5748 \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot \text{К}) = 6,594 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$v_2'' = 7,667 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$h_2' = 251,154 \text{ кДж/кг};$$

$$p_2 = 19,95 \text{ кПа.}$$

Находим степень сухости влажного пара:

$$x = \frac{v_1''}{v_2''} = 0,025.$$

Масса пара:

$$M = \frac{V}{v_1''} = 6,174 \text{ кг.}$$

Энтальпия 1 кг влажного пара:

$$h_2 = h_2' + r \cdot x = 310,9 \text{ кДж/кг.}$$

Полная энтальпия пара:

$$H_2 = Mh_2 = 1,92 \text{ МДж.}$$

Внутренняя энергия пара:

$$U_2 = M(h_2 - pv_2'') = 15732,73 \text{ кДж.}$$

Полная энтропия пара:

$$S_x = Ms_x = M(s' + (s'' - s')x) = 40,238 \text{ кДж/К.}$$

### ЗАДАЧА № 5

Изотермически расширяется 1 кг водяного пара с начальным давлением  $p_1 = 3$  МПа и сухости пара  $x_1 = 0,98$ , при этом к нему подводится теплота  $q = 500$  кДж/кг. Определить, пользуясь  $h$ - $s$ -диаграммой, параметры конечного состояния пара, работу расширения, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии. Решить задачу, если расширение происходит изобарно. Изобразить процессы в  $T$ - $s$ - и  $h$ - $s$ -диаграммах.

#### *Решение*

На рис. 6.1 представлена  $h$ - $s$ -диаграмма.

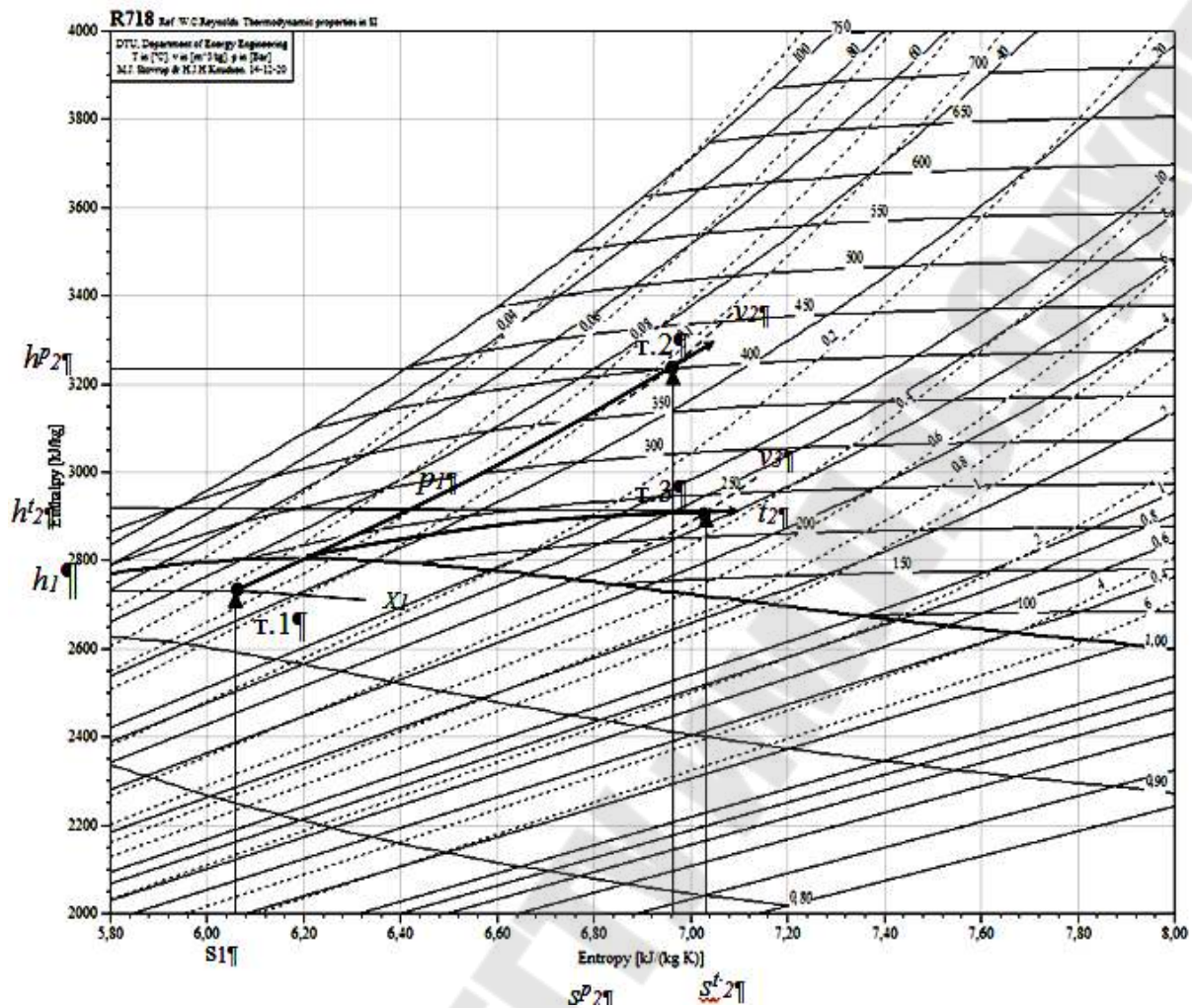


Рис. 6.1. Фрагмент  $h$ - $s$ -диаграммы воды и водяного пара

Построим точку  $I$  (на пересечении изобары  $p_1$  и кривой сухости  $x_1$ ).  
 Определим остальные параметры точки  $I$ :

$$s_1 = 6,03 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); \quad h_1 = 2720 \text{ кДж}/\text{кг}; \quad T_1 = 232 + 273,15 = 505,15 \text{ К}.$$

Удельный объем в точке  $I$  определяется по следующей формуле:

$$v_1 = v_1''x + (1-x)v_1' = 0,06518 \text{ м}^3/\text{кг},$$

где  $v_1'$  и  $v_1''$  следует определять по таблицам сухого насыщенного пара и воды:

$$v_1' = 0,001214 \text{ м}^3/\text{кг}; \quad v_1'' = 0,06797 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

*Изотермический процесс*

Количество теплоты при изотермическом расширении:

$$q = T(s_2 - s_1),$$

тогда

$$s_2 = \frac{q}{T} + s_1 = 7,02 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

На изотерме  $T_1$  строим точку 2 и определяем конечные параметры процесса:

$$h_2 = 2920 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

$$p_2 = 0,73 \text{ МПа}.$$

Определяем по  $h$ - $s$ -диаграмме:

$$v_2 = 0,3 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Изменение энтропии:

$$\Delta s = s_2 - s_1 = 0,99 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Изменение энтальпии:

$$\Delta h = h_2 - h_1 = 200 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Изменение внутренней энергии:

$$\Delta u = (h_2 - p_2 v_2) - (h_1 - p_1 v_1) = 176,54 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Работа расширения:

$$L_p = q - \Delta u = 323,46 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

*Изобарный процесс*

Изменение энтальпии в изобарном процессе:

$$\Delta h = q = 500 \text{ кДж}/\text{кг},$$

тогда

$$h_{2'} = h_1 + q = 3220 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Точка 2' находится на пересечении изобары  $p_1$  и линии постоянной энтальпии  $h_{2'}$ . По  $h$ - $s$ -диаграмме определим остальные параметры:

$$s_{2'} = 6,91 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$v_{2'} = 0,1 \text{ м}^3/\text{кг};$$



$$T_2 = 400 + 273,15 = 673,15 \text{ К.}$$

Изменение энтропии:

$$\Delta s = s_2 - s_1 = 0,88 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Работа расширения:

$$L_p = p_1 (v_2 - v_1) = 96,9 \text{ кДж/кг.}$$

Изменение внутренней энергии:

$$\Delta u = q - L_p = 403,1 \text{ кДж/кг.}$$

### ЗАДАЧА № 6

В воздушно-паровую смесь (влажностью  $d_1 = 10 \text{ г/кг}$  и энтальпией  $h_1 = 80 \text{ кДж/кг}$ ) в количестве  $G_B = 1818 \text{ кг/ч}$  подмешивают водяной пар в количестве  $G_{II} = 36,5 \text{ кг/ч}$  с энтальпией  $h_{II} = 3250 \text{ кДж/кг}$ . Определить конечные параметры воздушно-паровой смеси и построить луч процесса.

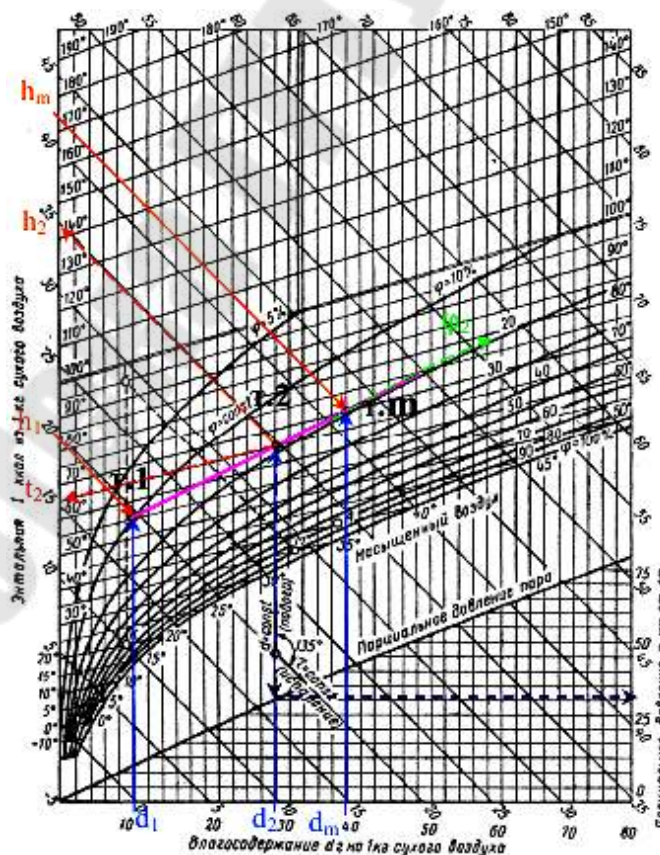


Рис. 6.2. Диаграмма  $h-s$  влажного воздуха

Точка  $1$  соответствует начальным параметрам воздушно-паровой смеси (рис. 6.2) и находится на пересечении изоэнтальпы  $h_1$  и линии постоянного влагосодержания  $d_1$ :

$$1 \text{ точка } h_1 = 80 \text{ кДж/кг} = 19 \text{ ккал/кг.}$$

Для построения луча процесса нужно определить:  
– угловой коэффициент луча процесса

$$\varepsilon = h_{\pi} = 3250 \text{ кДж/кг};$$

– приращение координат относительно точки  $1$ : зададимся  $\Delta d = 30 \text{ г/кг}$ .

Тогда приращение энтальпии составит:

$$\Delta h = \varepsilon \Delta d = 3250 \cdot 30 \cdot 10^{-3} = 97,5 \text{ кДж/кг.}$$

Координаты вспомогательной точки:

$$d_m = d_1 + \Delta d = 10 + 30 = 40 \text{ г/кг};$$

$$h_m = h_1 + \Delta h = 80 + 97,5 = 177,5 \text{ кДж/кг} = 42,3 \text{ ккал/кг.}$$

Определим конечное влагосодержание воздуха:

$$d_2 = d_1 + G_{\pi}/G_B = 10 + (36,5 \cdot 10^{-3}/1818) = 30 \text{ г/кг.}$$

Проводя линию  $d_2 = \text{const}$  до пересечения с лучом процесса, получим точку  $2$  и определим конечные параметры воздушно-паровой смеси:

- 1) энтальпия –  $h_2 = 34,6 \text{ ккал/кг} = 150 \text{ кДж/кг}$ ;
- 2) температура –  $t_2 = 65 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- 3) парциальное давление водяных паров –  $p_i = 31 \text{ мм рт. ст.} = 31 \cdot 133,3 = 4132 \text{ Па}$ ;
- 4) относительная влажность –  $\varphi = 20 \%$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вукалович, М. П. Термодинамика : учеб. пособие для вузов / М. П. Вукалович, И. И. Новиков. – М. : Машиностроение, 1972. – 670 с.
2. Кудинов, В. А. Техническая термодинамика : учеб. пособие для вузов / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов. – М. : Высш. шк., 2003. – 261 с.
3. Хрусталеv, Б. М. Техническая термодинамика : учеб. для строит. и энергет. специальностей вузов : в 2 ч. / Б. М. Хрусталеv, А. П. Несенчук, В. Н. Романюк. – Минск : Технопринт, 2004. – Ч. 1. – 486 с.
4. Хрусталеv, Б. М. Техническая термодинамика : учеб. для строит. и энергет. специальностей вузов : в 2 ч. / Б. М. Хрусталеv, А. П. Несенчук, В. Н. Романюк. – Минск : Технопринт, 2005. – Ч. 2. – 560 с.
5. Сборник задач по технической термодинамике / Т. Н. Андрианова [и др.]. – 3-е изд. – М. : Энергоиздат, 1981. – 240 с.
6. Андрианова, Т. Н. Сборник задач по технической термодинамике : учеб. пособие для вузов / Т. Н. Андрианова. – М. : МЭИ, 2006. – 354 с.

# ПРИЛОЖЕНИЕ

## Исходные данные к задачам и варианты заданий к контрольной работе

### ЗАДАЧА № 1

Воздух с начальным объемом  $V_1$ , м<sup>3</sup>, начальным давлением  $p_1$ , МПа и начальной температурой  $t_1$ , °С находится в баллоне. После открытия вентиля воздух истекает в окружающую среду с давлением  $p_2$ , МПа политропно с показателем политропы  $n$ . Определить массу воздуха, удельный объем и температуру в конце расширения, величину полезной работы, изменение внутренней энергии и количество отведенного или подведенного тепла. Решить задачу в случае, если расширение происходит изотермически и адиабатно. Данные для расчета и варианты заданий приведены в табл. П.1.1.

Таблица П.1.1

Величины	Последняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t_1$ , °С	48	43	38	33	28	27	22	17	13	7
$n$	1,1	1,2	1,3	1,7	1,5	1,6	1,5	1,7	1,3	1,2
$p_1$ , МПа	5,1	6,1	7,1	8,1	9,1	10,1	11,1	12,2	13,3	14,4
Предпоследняя цифра шифра										
$V_1$ , м <sup>3</sup>	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
$p_2$ , МПа	0,12	0,11	0,13	0,1	0,11	0,12	0,13	0,1	0,14	0,16

### ЗАДАЧА № 2

Объемный состав газовой смеси следующий: CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, Ar. Определить массовый состав газа, кажущуюся молекулярную массу и газовую постоянную, парциальные давления составляющих смеси, а также массовую, объемную и мольную теплоемкость смеси при нормальных условиях.

Данные для расчета и варианты заданий представлены в табл. П.1.2.

Таблица П.1.2

Газ	Последняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
CO <sub>2</sub> , %	5	10	15	20	25	20	15	10	5	15
Предпоследняя цифра шифра										
N <sub>2</sub> , %	20	26	19	33	43	22	55	10	48	62
Ar, %	определяется расчетом									

### ЗАДАЧА № 3

Воздух при давлении  $p_1$ , МПа и температуре  $t_1$ , °С вытекает из расширяющегося сопла (угол конусности расширяющейся части сопла  $\alpha$ ) в среду с давлением  $p_2$ , МПа. Расход воздуха –  $M$ , кг/с. Определить размеры сопла. Расширение воздуха в сопле считать адиабатным. Данные для расчета и варианты заданий представлены в табл. П.1.3.

Таблица П.1.3

Величины	Последняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$p_1$ , МПа	1,1	2,2	1,6	2,4	1,3	2,2	1,4	2,7	1,2	1,8
$t_1$ , °С	295	315	325	335	345	275	265	375	245	195
Величины	Предпоследняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$p_2$ , МПа	0,1	0,09	0,08	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,17	0,2
$M$ , кг/с	3	3,5	4	4,5	4	3,5	3	2,5	2	1,5
$\alpha$ , °	7	8	9	10	11	12	13	7	8	9

### ЗАДАЧА № 4

В закрытом сосуде содержится сухой насыщенный водяной пар объемом  $V$ , м<sup>3</sup> при давлении  $p_1$ , МПа. Определить давление, степень сухости пара, энтропию, энтальпию, внутреннюю энергию и количество отданного им тепла, если он охладится до температуры  $t_2$ , °С. Данные для расчета и варианты заданий представлены в табл. П.1.4.

Таблица П.1.4

Величины	Последняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$p_1$ , МПа	1,1	2,1	1,6	1,5	1,7	1,3	1,4	1,2	1,9	1,3
Величины	Предпоследняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t_2$ , °С	60	100	70	80	90	80	70	60	50	80
$V$ , м <sup>3</sup>	1,2	3,2	4,2	5,2	6,2	7,2	8,2	9,3	8,3	6,3

### ЗАДАЧА № 5

Изотермически расширяется 1 кг водяного пара с начальным давлением  $p_1$ , МПа и сухости пара  $x_1$ , при этом к нему подводится теплота  $q$ , кДж/кг. Определить, пользуясь  $h$ - $s$ -диаграммой, параметры конечного состояния пара, работу расширения, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии. Решить задачу, если расширение про-

исходит изобарно. Изобразить процессы в  $T-s$ - и  $h-s$ -диаграммах. Данные для расчета и варианты заданий представлены в табл. П.1.5.

Таблица П.1.5

Величины	Последняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$p_1$ , МПа	3	3,2	3,4	3,6	3,8	4	4,2	4,4	4,6	4,8
	Предпоследняя цифра шифра									
$x_1$	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,9	0,95
$q$ , кДж/кг	500	450	550	430	520	490	550	470	490	510

### ЗАДАЧА № 6

В воздушно-паровую смесь (влажностью  $d_1$ , г/кг и энтальпией  $h_1$ , кДж/кг) в количестве  $G_B$ , кг/ч подмешивают водяной пар в количестве  $G_{II}$ , кг/ч с энтальпией  $h_{II} = 3250$  кДж/кг. Определить конечные параметры воздушно-паровой смеси и построить луч процесса. Данные для расчета и варианты заданий представлены в табл. П.1.6.

Таблица П.1.6

Величины	Последняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$G_{II}$ , кг/ч	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
$G_B$ , кг/ч	1818	1875	1923	1964	2000	2031	2059	2083	2105	2115
	Предпоследняя цифра шифра									
$h_1$ , кДж/кг	170	165	160	155	150	145	140	135	130	125
$d_1$ , г/кг	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Термодинамические процессы идеальных газов. Расчет параметров состояния и энергетических характеристик процессов.....	3
2. Смеси идеальных газов. Закон Дальтона.....	7
3. Расчет располагаемой работы, скорости истечения и расхода газа.....	9
4. Диаграмма $h-s$ водяного пара.....	11
5. Диаграмма $h-d$ влажного воздуха.....	13
6. Примеры решения задач.....	15
Литература.....	27
Приложение.....	27

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

**Овсянник Анатолий Васильевич**  
**Нижников Артем Александрович**  
**Новиков Михаил Николаевич**

## **ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА**

**Практикум**  
**по одноименному курсу**  
**для студентов специальностей**  
**1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика»**  
**и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация**  
**энергооборудования организаций»**  
**дневной и заочной форм обучения**

**Электронный аналог печатного издания**

Редактор *Т. Н. Мисюрова*  
Компьютерная верстка *Е. Б. Яцук*

Подписано в печать 15.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Ризография. Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 2,05.

Изд. № 141.

<http://www.gstu.by>

Издатель и полиграфическое исполнение:

Издательский центр

Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого».

Свидетельство о гос. регистрации в качестве издателя  
печатных изданий за № 1/273 от 04.04.2014 г.

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48