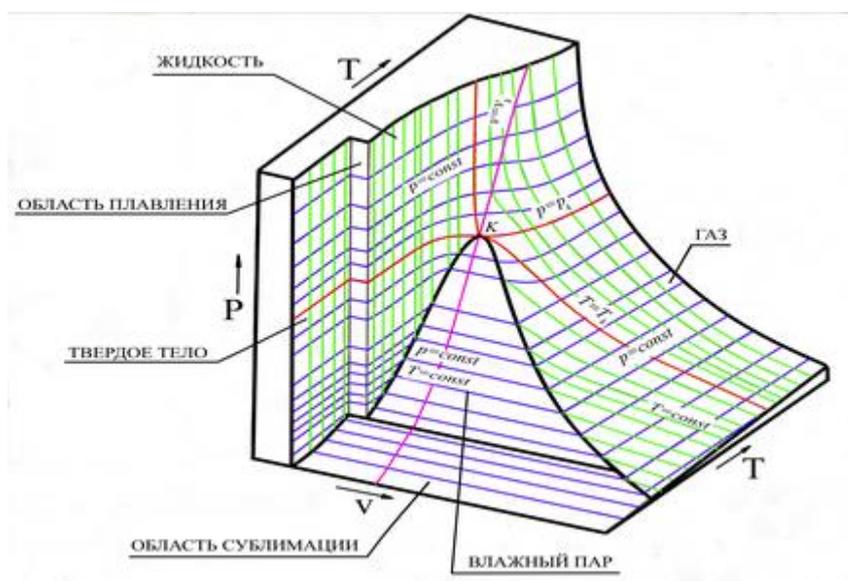


**В.В. Митропов, О.Б. Цветков**  
**СБОРНИК ЗАДАЧ ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ**  
**ТЕРМОДИНАМИКЕ**



Санкт-Петербург  
2022

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**В.В. Митропов, О.Б. Цветков**  
**СБОРНИК ЗАДАЧ ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ**  
**ТЕРМОДИНАМИКЕ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ  
ИТМО

по направлению подготовки 15.04.04, 16.04.01, 16.04.03, 18.04.02  
в качестве учебного пособия для реализации основных профессиональных  
образовательных программ высшего образования магистратуры



Санкт-Петербург  
2022

Митропов В.В., Цветков О.Б., Сборник задач по технической термодинамике– СПб: Университет ИТМО, 2022. – 184 с.

Рецензент(ы):

Малышев Александр Александрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент (квалификационная категория "ординарный доцент") факультета энергетики и экотехнологий, Университета ИТМО.

Сборник содержит теоретические сведения, примеры решения задач, справочные данные, необходимые для расчета процессов низкотемпературной энергетики, систем кондиционирования воздуха, иллюстрирует процессы, происходящие в низкотемпературных пищевых технологиях. Для студентов высших учебных заведений по направлениям подготовки 15.04.04, 16.04.01, 16.04.03, 18.04.02.



**Университет ИТМО** – национальный исследовательский университет, ведущий вуз России в области информационных, фотонных и биохимических технологий. Альма-матер победителей международных соревнований по программированию – ICPC (единственный в мире семикратный чемпион), Google Code Jam, Facebook Hacker Cup, Яндекс.Алгоритм, Russian Code Cup, Topcoder Open и др. Приоритетные направления: IT, фотоника, робототехника, квантовые коммуникации, трансляционная медицина, Life Sciences, Art&Science, Science Communication. Входит в ТОП-100 по направлению «Автоматизация и управление» Шанхайского предметного рейтинга (ARWU) и занимает 74 место в мире в британском предметном рейтинге QS по компьютерным наукам (Computer Science and Information Systems). С 2013 по 2020 гг. – лидер Проекта 5–100.

© Университет ИТМО, 2022  
© Митропов В.В., Цветков О.Б., 2022

## Список основных условных обозначений

$V$	– объем, м <sup>3</sup> ;
$v$	– удельный объем, м <sup>3</sup> /кг;
$M$	– масса, кг;
$p$	– давление, Па ;
$B$	– атмосферное давление, гПа, мм рт. ст.;
$\rho$	– плотность, кг/м <sup>3</sup> ;
$T$	– температура по шкале Кельвина, К;
$t$	– температура по шкале Цельсия, °С;
$\mu$	– масса киломоля, кг/кмоль;
$R$	– удельная газовая постоянная, Дж/(кг·К);
$\mu R$	– универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К);
$g_i$	– массовая доля компонента в смеси;
$r_i$	– объемная доля компонента в смеси;
$Q, q$	– теплота, кДж; кДж/кг;
$U, u$	– внутренняя энергия, кДж; кДж/кг;
$L, l$	– работа, кДж; кДж/кг;
$h$	– энтальпия, кДж/кг;
$s$	– энтропия, кДж/(кг·К);
$x$	– степень сухости пара;
$r$	– удельная теплота парообразования, кДж/кг;
$c$	– удельная массовая теплоемкость, кДж/(кг·К);
$c'$	– удельная объемная теплоемкость, кДж/(м <sup>3</sup> <sub>n</sub> ·К);
$\mu c$	– мольная теплоемкость, кДж/(кмоль·К);
$k$	– показатель адиабаты;
$n$	– показатель политропы;
$N$	– мощность, Вт; кВт;
$\eta_t$	– термический КПД цикла;
$\varepsilon$	– холодильный коэффициент цикла;
$\mu$	– отопительный коэффициент цикла;
$w$	– скорость, м/с;
$\beta$	– отношение давлений;
$a$	– скорость звука, м/с;
$M$	– расход среды при истечении, кг/с;
$f$	– площадь, м <sup>2</sup> ;
$e$	– абсолютная влажность воздуха, г/м <sup>3</sup> ;
$\varphi$ –	– относительная влажность воздуха, кг/м <sup>3</sup> ;
$d$	– влагосодержание влажного воздуха, г/кг; кг/кг;
$\psi$	– степень насыщения влажного воздуха.

## Индексы

вл	влага;
с.в	сухой воздух;
абс	абсолютное ;
т	туман;
п.п	перегретый пар;
‘	насыщенная жидкость;
“	сухой насыщенный пар;
кр	критический;
max	максимальный;
min	минимальный;
<i>i</i>	множитель подобного преобразования.

## Предисловие

Предлагаемое учебное пособие в соответствии с Климатическим пактом принятым ООН в ноябре 2021 содержит ряд императивных задач, решение разбор которых впервые информирует студентов о предстоящем четвертом энергетическом переходе в мировой экономике к 2060 году способствует осмысленному закреплению курса технической термодинамики в условиях изменяющейся реальности для магистров по направлениям подготовки 15.04.04, 16.04.01, 16.04.03, 18.04.02.

Главы задачника соответствуют основным разделам дисциплины. Каждая глава состоит из двух частей: в первой части главы приводятся основные понятия и теоретические зависимости; во второй части представлены практические примеры, наиболее познавательные из которых приведены с подробным решением.

Приложения содержат реальный справочный материал в форме таблиц и диаграмм для лучшей трансформации познания и приобретения активных практических навыков самостоятельного поиска студентами необходимых в будущем данных. Таблицы и диаграммы приведены в объеме, достаточном для решения предлагаемых задач.

Отдельные ретроспективные задачи имеют свои прототипы в таком общепризнанно позитивном полезном издании, как сборник задач, подготовленный С.Н. Богдановым, А.В. Клецким и А.В. Куприяновой в 1996г. [3]

## Глава 1. Основные законы идеальных газов

**Удельный объем** ( $v$ ) – объем единицы массы данного вещества [ $\text{м}^3/\text{кг}$ ]

$$v = \frac{V}{m}, \quad (1.1)$$

где  $V$  – объем в  $\text{м}^3$ ;  $m$  – масса в кг.

**Плотность** ( $\rho$ ) – это масса единицы объема вещества, [ $\text{кг}/\text{м}^3$ ]

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{m}{V}. \quad (1.2)$$

**Давление** ( $p$ ) – это сила воздействия вещества на ограничивающую его поверхность, отнесенная к единице этой поверхности, [ $\text{Па}=\text{н}/\text{м}^2$ ]. Термодинамическим параметром состояния является только *абсолютное давление*. Под ним понимают давление, отсчитываемое от нуля.

Абсолютное давление выше атмосферного определяется как

$$p_{\text{абс}} = p_{\text{бар}} + p_{\text{изб}}, \quad (1.3)$$

а абсолютное давление ниже атмосферного определяется как

$$p_{\text{абс}} = p_{\text{бар}} - p_{\text{вак}}. \quad (1.4)$$

Здесь:  $p_{\text{изб}}$  – избыточное (или манометрическое) давление;  
 $p_{\text{вак}}$  – показание вакуумметра (вакуум или разрежение);  
 $p_{\text{бар}}$  – атмосферное (или барометрическое) давление.  
Соотношение между различными единицами давления:

$$1 \text{ Па} = 10^{-5} \text{ бар} = 7,502 \cdot 10^{-3} \text{ мм рт. ст.} = 0,102 \text{ мм вод. ст.}$$

При измерении давления ртутными приборами их показания необходимо приводить к  $0^\circ\text{C}$ :

$$p_0 = p(1 - 0,000172t) \quad (1.5)$$

где:  $p_0$  – показание прибора, мм рт. ст., приведенное к  $0^\circ\text{C}$ ;  
 $p$  – действительная высота ртутного столба при температуре воздуха  $t$ ,  $^\circ\text{C}$ ;  
0,000172 – коэффициент объемного расширения ртути.

Соотношения между различными единицами давления приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

## Соотношение между различными единицами давления

Наименование единицы	Па	бар	мм рт. ст.	мм вод. ст.	кгс/см <sup>2</sup>	lbf/in <sup>2</sup>
Паскаль	1	10 <sup>-5</sup>	7,502·10 <sup>-3</sup>	0,102	1,02·10 <sup>-5</sup>	1,45·10 <sup>-4</sup>
Бар	10 <sup>5</sup>	1	7,502·10 <sup>2</sup>	1,02·10 <sup>4</sup>	1,02	14,5
Миллиметр ртутного столба	133,3	1,333·10 <sup>-3</sup>	1	13,6	1,36·10 <sup>-3</sup>	1,934·10 <sup>-3</sup>
Миллиметр водяного столба	9,8067	9,8067·10 <sup>-5</sup>	7,36·10 <sup>-2</sup>	1	10 <sup>-4</sup>	1,422·10 <sup>-3</sup>
Килограмм-сила на квадратный сантиметр	9,8067·10 <sup>4</sup>	0,98067	7,36·10 <sup>2</sup>	10 <sup>4</sup>	1	14,22
Фунт-сила на квадратный дюйм	6,9948·10 <sup>3</sup>	6,8948·10 <sup>-2</sup>	52,2	7,0307·10 <sup>2</sup>	7,0307·10 <sup>-2</sup>	1

**Температура** ( $t$ ,  $T$ ) – мера нагретости тела. Температуру можно рассматривать как параметр, одинаковый у частей термодинамической системы, находящихся в состоянии термического равновесия. По действующему стандарту приняты две температурные шкалы: термодинамическая и международная температурная шкала. Отсчеты по каждой из этих шкал можно выразить либо в кельвинах ( $T$ , [К]), либо в градусах Цельсия ( $t$ , [°C]). Соотношение между температурами, выраженными в кельвинах и градусах Цельсия, имеет вид

$$T = t + 273,15. \quad (1.6)$$

В некоторых странах для измерения температуры применяют шкалу Фаренгейта. Для перевода показаний этой шкалы в градусы Цельсия и обратно служат соотношения

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9}(t^{\circ}\text{F} - 32), \quad (1.7)$$

$$t^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5}t^{\circ}\text{C} + 32. \quad (1.8)$$

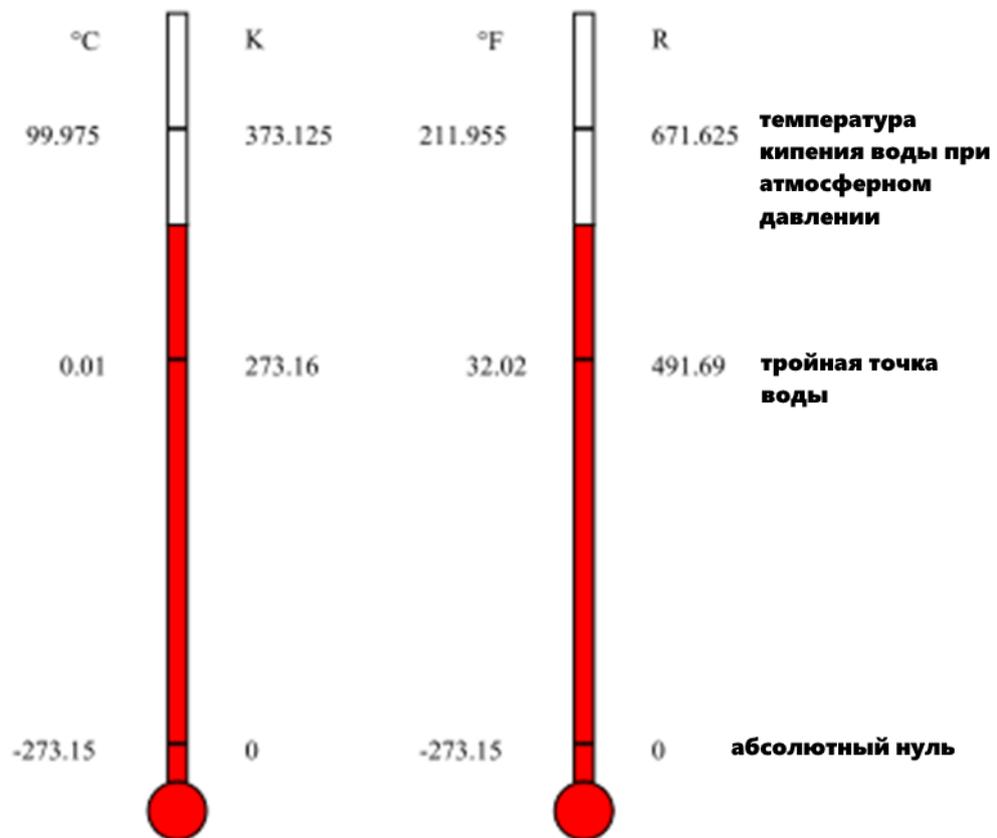


Рис.1. Соотношение различных температурных шкал

**Теплоемкостью** называют количество теплоты, которое необходимо сообщить телу или отнять от него, чтобы изменить его температуру на один кельвин.

*Удельной теплоемкостью* называют то количество теплоты, которое необходимо сообщить телу или отнять от него, чтобы изменить температуру какой-либо его количественной единицы на один кельвин. Очень часто, говоря о теплоемкости тела, подразумевают его удельную теплоемкость.

В зависимости от выбранной единицы измерения количества вещества различают:

$c$  – массовую теплоемкость [кДж/(кг·К)], т. е. теплоемкость, отнесенную к 1 кг рабочего тела;

$c'$  – объемную теплоемкость [кДж/(м<sup>3</sup>·К)], т. е. теплоемкость, отнесенную к 1 м<sup>3</sup> рабочего тела;

$\mu c$  – мольная теплоемкость [кДж/(кмоль·К)], т. е. теплоемкость, отнесенную к одному кмолью рабочего вещества.

Указанные теплоемкости связаны между собой следующими зависимостями:

$$c = \frac{\mu c}{\mu} = \frac{c'}{\rho_0}, \quad (1.9)$$

$$c' = \frac{\mu c}{22,4} = c\rho_0, \quad (1.10)$$

где  $\mu$  – молекулярный вес и  $\rho$ , [кг/ м<sub>н</sub><sup>3</sup>] – плотность газа при нормальных физических условиях ( $p=760$  мм рт. ст.,  $t=0$  °С).

Количество тепла, сообщаемое рабочему телу, зависит от особенностей протекания термодинамического процесса. Поэтому теплоемкость рабочего тела также зависит от процесса.

*Изохорная* теплоемкость –  $c_v$  (в процессе при  $v=const$ ).

*Изобарная* теплоемкость –  $c_p$  (в процессе при  $p=const$ ).

Так как в изохорном процессе идеального газа вся подведенная к газу теплота расходуется только на изменение внутренней энергии, а в изобарном – и на совершение работы, теплоемкость в изобарном процессе больше на величину этой работы (уравнение Майера):

$$c_p - c_v = R. \quad (1.11)$$

В общем случае теплоемкость зависит от температуры. В связи с этим различают истинную и среднюю теплоемкость.

*Истинной* называют теплоемкость, соответствующую бесконечно малому изменению температуры, т.е. теплоемкость на бесконечно малом участке процесса или условно в точке процесса:

$$c = \frac{dq}{dT}. \quad (1.12)$$

*Средней* является теплоемкость, соответствующая изменению температуры от  $T_1$  до  $T_2$ :

$$c_m = \frac{q_{1-2}}{T_2 - T_1}. \quad (1.13)$$

Зависимость истинных теплоемкостей от температуры определяется интерполяционными формулами вида

$$c = a + bt + et^2, \quad (1.14)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $e$  – постоянные коэффициенты, зависящие от природы газа.

В ряде случаев возможна замена криволинейной зависимости теплоемкости на линейную (с некоторой допустимой погрешностью). В этом случае истинная теплоемкость выражается функцией вида

$$c = a + bt, \quad (1.15)$$

средняя теплоемкость

$$c_m = a + \frac{b}{2}t. \quad (1.16)$$

Величины истинных и средних теплоемкостей обычно находят по таблицам, в которых значения средних теплоемкостей приводятся для интервалов температур с началом отсчета 0 °С. Тогда среднюю теплоемкость для интервала температур от  $t_1$  до  $t_2$  можно определить из формулы

$$|c_m|_{t_1}^{t_2} = \frac{|c_m|_{t_0}^{t_2} t_2 - |c_m|_{t_0}^{t_1} t_1}{t_2 - t_1}. \quad (1.17)$$

Если пренебречь зависимостью теплоемкости от температуры, то для приближенных расчетов можно принимать следующие значения молярных теплоемкостей при постоянных объеме и давлении ( $c=const$ ).

Газы	$\mu_{c_v}$ , кДж/(кмоль·К)	$\mu_{c_p}$ , кДж/(кмоль·К)
Одноатомные	12,56	20,93
Двухатомные	20,93	29,31
Трех- и многоатомные	29,31	37,68

Уравнение состояния идеального газа получено в результате совместного использования **закона Бойля-Мариотта** ( $\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_1}{v_2}$ , при  $T=const$ ) и **закона Гей-**

**Люссака** ( $\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$ , при  $v=const$ ). Уравнение состояния имеет вид:

для 1 кг газа

$$pv = RT, \quad (1.18)$$

для  $M$  кг газа

$$pV = MRT, \quad (1.19)$$

для 1 кмоль газа

$$pV_\mu = \mu RT, \quad (1.20)$$

где:  $p$  – давление газа, Па;  $v$  – удельный объем газа, м<sup>3</sup>/кг;  $V$  – объем произвольной массы газа, м<sup>3</sup>;  $V_\mu$  – объем 1 кмоль газа, м<sup>3</sup>/кмоль;  $R$  – удельная газовая постоянная, Дж/(кг·К);  $\mu R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К).

Числовое значение универсальной газовой постоянной можно получить, подставив в уравнение значение входящих в него величин при нормальных физических условиях ( $t=0$  °С,  $p=760$  мм рт. ст.):

$$\mu R = \frac{pV_\mu}{T} = \frac{101325 \cdot 22,4136}{273,15} = 8314 \text{ Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К}).$$

**Газовая постоянная** для любого газа ( $R$ ) можно определить по формуле:

$$R = \frac{8314}{\mu} \quad (1.21)$$

**Закон Авогадро** позволяет определить объем моля  $V_\mu$ . При нормальных физических условиях ( $t=0$  °С,  $p=760$  мм рт. ст.) объем одного киломоля идеального газа равен 22,4136 м<sup>3</sup>/кмоль.

Плотность газа при нормальных условиях можно определить из равенства

$$\rho_n = \frac{\mu}{22,4} \cdot \quad (1.22)$$

## Задачи

**1.1.** Определить абсолютное давление воздуха во всасывающем воздуховоде кондиционера, если разрежение в нем составляет 50 мм вод. ст., а атмосферное давление по ртутному барометру равняется 730 мм рт. ст. при 32 °С

**Дано:**  
 $p_{\text{вак}}=50$  мм вод. ст.  
 $p_{\text{бар}}=B=730$  мм рт. ст.  
 $t=32$  °С

$p_{\text{абс}}=?$

**Решение:**

Переведем мм вод.ст. в мм рт. ст.

$$p_{\text{вак}}=50 \cdot 7,36 \cdot 10^{-2}=3,68 \text{ мм рт. ст.}$$

При измерении давления ртутными приборами их показания необходимо приводить к 0 °С

$$p_0 = p \cdot (1 - 0,000172 \cdot t) = 730 \cdot (1 - 0,000172 \cdot 32) = 725,98 \text{ мм рт.ст.}$$

Абсолютное давление ниже атмосферного определяется как

$$p_{\text{абс}} = p_{\text{бар}} - p_{\text{вак}} = 725,98 - 3,68 = 722,3 \text{ мм рт.ст.}$$

Переведем мм рт.ст в Па

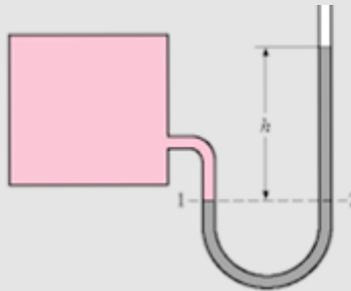
$$p_{\text{абс}} = 722,3 / 750,2 = 96,3 \cdot 10^3 \text{ Па}$$

**1.2.** К бензобаку присоединены датчик давления и ртутный манометр. Если показания прибора от датчика давления составляют 80 кПа, определите расстояние между двумя уровнями ртутного манометра (плотность ртути – 13600 кг/м<sup>3</sup>).

**Дано:**  
 $p_{\text{ман}}=80$  кПа  
 $\rho=13600$  кг/м<sup>3</sup>

$h=?$

**Решение:**



$$h = \frac{\Delta p}{\rho g} = \frac{80 \cdot 10^3}{13600 \cdot 9,81} = 0,6 \text{ м}$$

**1.3.** Определить абсолютное давление рабочего тела в конденсаторе холодильной машины, если манометр показывает 12,5 бар, а атмосферное давление 1040 гПа.

**Ответ:**  $p_{\text{абс}}=1,354$  МПа

**1.4.** Какая температура в градусах Фаренгейта соответствует абсолютному нулю?

**Дано:**  
 $t=-273,15$  °С

$t$  °F –?

**Решение:**

$$t^{\circ}\text{F} = 1,8 \cdot t^{\circ}\text{C} + 32$$

$$t^{\circ}\text{F} = 1,8 \cdot (-273,15) + 32 = -459,67$$

**1.5.** Разрежение в сублиматоре установки для сушки продуктов составляет 99 175 Па. Атмосферное давление 750 мм рт. ст. при  $t=30$  °С. Определить абсолютное давление в сублиматоре.

**Ответ:**  $p_{абс}=2$  мм рт. ст.=267 Па

**1.6.** Абсолютное давление рабочего тела в испарителе холодильной машины равно 0,095 МПа. Атмосферное давление 747 мм рт. ст. Чему равно показание манометра (в кгс/см<sup>2</sup>), установленного на испарителе?

**Ответ:**  $p_{изб}=0$

**1.7.** В рекомендациях фирмы, изготовившей холодильную машину, указано, что степень перегрева паров перед компрессором желательно поддерживать равной 40 градусов по шкале Фаренгейта. Чему равна эта степень перегрева, выраженная в градусах Цельсия?

**Ответ:**  $\Delta t=22,2$  °С

**1.8.** Температура воздуха при прохождении через калорифер повысилась на 38 °С. Чему равно повышение температуры в градусах Фаренгейта?

**Ответ:**  $\Delta t=68,4$  °F

**1.9.** Во сколько раз изменится плотность газа в сосуде, если при постоянной температуре показание манометра уменьшится с 15 до 3 бар? Атмосферное давление принять равным 1000 гПа.

**Дано:**  
 $p_1=15$  бар  
 $p_2=3$  бар  
 $B=1000$  гПа

$\rho_2=?$

**Решение:**

$$p_{1a} = p_1 + B = 15 \cdot 10^5 + 1000 \cdot 10^2 = 16 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$p_{2a} = p_2 + B = 3 \cdot 10^5 + 1000 \cdot 10^2 = 4 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

*Закон Бойля-Мариотта*

$$p v = \text{const}$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{p_2}{p_1} = \frac{v_1}{v_2} \\ \rho = \frac{1}{v} \end{array} \right\} \frac{p_2}{p_1} = \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

$$\rho_2 = \rho_1 \frac{4}{16} = \frac{1}{4} \rho_1$$

**1.10.** Плотность воздуха при нормальных условиях 1,293 кг/м<sup>3</sup>. Чему равна плотность воздуха при давлении 10<sup>4</sup> Па и температуре -10 °С.

**Ответ:**  $\rho=0,132$  кг/м<sup>3</sup>

**1.11.** При какой температуре 1 кмоль газа занимает 18 м<sup>3</sup>, если давление газа 10<sup>5</sup> Па?

**Ответ:**  $T=216,6$  К

**1.12.** Сравнить значения плотностей метана СН<sub>4</sub> и кислорода О<sub>2</sub>, находящихся при одинаковых давлениях и температурах.

**Ответ:**  $\rho_{CH_4}/\rho_{O_2}=0,5$

**1.13.** Удельная газовая постоянная аммиака  $488 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ , показатель адиабаты  $1,29$ . Определить массовую теплоемкость аммиака при постоянных объеме и давлении.

<p><b>Дано:</b>  <math>R_{\text{NH}_3}=488 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})</math>  <math>k=1,29</math></p>	<p><b>Решение:</b>  По закону Майера  <math>c_p - c_v = R</math>  Делим обе части уравнения на <math>c_v</math></p>
<p><math>c_v, c_p - ?</math></p>	<p><math>\frac{c_p}{c_v} - 1 = \frac{R}{c_v}; k = \frac{c_p}{c_v}</math>, отсюда  <math>c_v = \frac{R}{k-1} = \frac{488}{1,29-1} = 1683 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})</math>  <math>c_p = c_v + R = 1683 + 488 = 2171 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})</math></p>

**1.14.** В калорифере системы кондиционирования воздух подогревается при неизменном давлении  $1000 \text{ гПа}$  от  $t_1=-10 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $t_2=20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Найти количество подводимой к воздуху теплоты и его конечный объем, если массовый расход его равен  $1000 \text{ кг/ч}$ .

**Ответ:**  $Q=8,43 \text{ кВт}$ ;  $V_2=840 \text{ м}^3/\text{кг}$

**1.15.** К некоторому газу массой  $2 \text{ кг}$  изобарно подводится теплота в количестве  $41760 \text{ Дж}$ . При этом температура газа повысилась от минус  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Показатель адиабаты для этого газа  $k=1,665$  ( $k=c_p/c_v$ ). Определить, что это за газ.

**Ответ:** Аргон

**1.16.** Определить показатель адиабаты метана, если известна его молярная теплоемкость  $\mu c_v=26,43 \text{ кДж}/(\text{кмоль}\cdot\text{К})$ .

**Ответ:**  $k=1,315$

**1.17.** Определить среднюю массовую теплоемкость воздуха в процессе изобарного нагрева от  $100$  до  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ : 1) считая зависимость теплоемкости от температуры нелинейной (т.е. используя табличные данные); 2) считая зависимость  $c=f(t)$  линейной и используя формулу  $c_{pm}=0,9952+0,0000935t$ ; 3) используя приближенную формулу, вообще не учитывающую зависимость теплоемкости от температуры. Определить относительную ошибку во 2-м и 3-м случаях расчета.

<p><b>Дано:</b>  <math>t_1=100 \text{ }^\circ\text{C}</math>  <math>t_2=1000 \text{ }^\circ\text{C}</math></p>	<p><b>Решение:</b>  1). <math>c_{pm} _{100}^{1000} = \frac{1,0907 \cdot 1000 - 1,0061 \cdot 100}{1000 - 100} = 1,1 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})</math>  2). <math>c_{pm} _{100}^{1000} = 0,9952 + 0,0000935 \cdot (100 + 1000) = 1,098 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})</math>  3). Для двухатомных газов  <math>\mu c_p = 29,31 \text{ кДж}/(\text{кмоль}\cdot\text{К}); c_{pm} = \frac{\mu c_p}{\mu} = 1,012</math>  Относительная ошибка  во втором случае составляет <math>-0,18\%</math>; в третьем <math>-8\%</math></p>
<p><math>c_{pm} - ?</math></p>	

**1.18.** Определить среднюю молярную теплоемкость кислорода при температурах 500-1000 °С, если выражение для его истинной теплоемкости имеет вид  $\mu c_p = 28,99 + 0,01065 \cdot t - 3,553 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$  кДж/(кмоль·К).

<p><b>Дано:</b>  <math>t_1 = 500</math> °С  <math>t_2 = 1000</math> °С</p>	<p><b>Решение:</b>  Средняя молярная теплоемкость кислорода в интервале температур 500-1000 °С определяется из уравнения:</p>
<p><math>c_{pm} - ?</math></p>	$c_{pm} \Big _{500}^{1000} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} (28,99 + 0,01065t - 3,553 \cdot 10^{-6} t^2) dt$ $c_{pm} \Big _{500}^{1000} = 28,99 + 0,01065 \frac{500 + 1000}{2} - 3,553 \cdot 10^{-6} \frac{300^2 + 300 \cdot 400 + 400^2}{3}$ $c_{pm} \Big _{500}^{1000} = 37,416 \text{ кДж/(кмоль·К)}$

**1.19.** Рассчитать среднюю массовую теплоемкость воздуха при его охлаждении от 50 до 0 °С в изобарном процессе, если его истинную теплоемкость можно определить по формуле  $c_p = 0,9975 + 1,14 \cdot 10^{-4} t - 2,9 \cdot 10^{-8} t^2$  кДж/(кг·К).

**Ответ:**  $c_{pm} = 1,0003$  кДж/(кг·К)

**1.20.** Молярная теплоемкость аммиака при температуре 300 К составляет согласно экспериментальным данным  $\mu c_v = 28,5$  кДж/(кмоль·К), а при температуре 800 К она равна 40,1 кДж/(кмоль·К). Используя эти данные, найти интерполяционную формулу, отражающую зависимость  $\mu c_v = f(t)$ .

**Ответ:**  $\mu c_v = 21,54 + 0,02332t$  кДж/(кг·К)

**1.21.** Массовая изобарная теплоемкость аргона равна 0,522 кДж/(кг·К). Найти молярную изохорную и объемную изохорную теплоемкости аргона.

**Ответ:**  $\mu c_v = 12,54$  кДж/(кмоль·К);  $c'_v = 0,559$  кДж/(м<sup>3</sup>·К)

**1.22.** Плотность какого инертного газа при давлении 0,5551 МПа в 11 раз больше плотности водорода при той же температуре и давлении 1 МПа?

**Ответ:** Аргон

**1.23.** Газ, который можно считать идеальным, находится в цилиндре под свободнодвижущимся поршнем. Диаметр цилиндра 20 см. В начальных условиях при температуре 30 °С газ занимает объем 0,012 м<sup>3</sup>. До какой температуры должен быть нагрет газ при постоянном давлении, чтобы поршень поднялся на 29 см?

**Ответ:**  $V_2 = 0,0211$  м<sup>3</sup>;  $T_2 = 533$  К

**1.24.** В камере холодильника находится воздух при температуре 0 °С и давлении 1013 гПа. Определить удельный объем воздуха в камере, а также объем камеры, если известно, что масса воздуха, находящегося в ней, равна 646 кг.

**Ответ:**  $v_H = 0,774$  м<sup>3</sup>/кг;  $V = 500$  м<sup>3</sup>

**1.25.** Подсоединенный к воздушному резервуару мановакуумметр показывает вначале избыточное давление 667 гПа. Затем, после израсходования части воздуха, прибор показал разрежение, равное 293 гПа. Какую долю составляет масса оставшегося воздуха от начальной массы? Барометрическое давление равно 1013 гПа. Температура воздуха не изменяется.

**1.26.** Манометр на 40-литровом баллоне с этиленом показывает 20 кПа. Определить массу этилена в баллоне, если температура равна 37 °С, а атмосферное давление составляет 95 кПа.

**Ответ:**  $M=0,05$  кг

**1.27.** Во сколько раз больше воздуха (по массе) вмещает баллон при температуре -20 °С, чем при температуре 60 °С? В обоих случаях давление воздуха одинаковое.

**Ответ:**  $M_1/M_2=1,316$

**1.28.** При давлении 0,2 МПа и температуре 100 °С плотность газа равна 0,13 кг/м<sup>3</sup>. Что это за газ?

**Ответ:** Водород

**1.29.** Определить массу воздуха, находящегося в комнате площадью 20 м<sup>2</sup> и высотой 3,5 м. Температура воздуха в комнате 18 °С, барометрическое давление 1027 гПа.

**Ответ:**  $M=86,05$  кг

**1.30.** Какая масса воздуха выйдет из реторты вместимостью 800 см<sup>3</sup>, если ее температуру повысить с 12 до 60 °С? Атмосферное давление принять равным 994 гПа.

**Ответ:**  $M=0,14$  г

**1.31.** Вентилятор подает в систему кондиционирования воздух объемом 50 000 м<sup>3</sup>/час при температуре 30 °С и избыточном давлении 200 мм вод.ст. Атмосферное давление 987 гПа. Определить часовую производительность вентилятора, пересчитанную на м<sup>3</sup><sub>н</sub>.

**Ответ:**  $V=44710$  м<sup>3</sup><sub>н</sub>/ч

**1.32.** Парциальное давление водяного пара в воздухе комнаты 1,5 кПа. Сколько водяного пара (по массе) находится в комнате, если ее площадь 30 м<sup>2</sup> и высота 3 м? Температура воздуха 20 °С.

**Ответ:**  $M=0,998$  кг

**1.33.** Баллон вместимостью 25 л наполнен сжатым воздухом. При температуре 27 °С манометр показывает 12 МПа. Какой объем воды можно вытеснить воздухом этого баллона из цистерны, находящейся на глубине 30 м и заполненной водой при температуре 5 °С? Давление атмосферного воздуха 1000 гПа.

**Дано:**  
 $V_б=25$  л  
 $t_в=27$  °С  
 $p_б=12$  МПа  
 $H=30$  м  
 $t_{воды}=5$  °С  
 $B=1000$  гПа  
 $V=?$

**Решение:**  
 Абсолютное давление воздуха в баллоне  
 $p_{1а} = p_б + B = 12 \cdot 10^6 + 1000 \cdot 10^2 = 12,1 \cdot 10^6$  Па  
 Массу воздуха в баллоне находим из уравнения состояния:  

$$M = \frac{p_{1а} \cdot V}{R \cdot T} = \frac{12,1 \cdot 10^6 \cdot 25 \cdot 10^{-3}}{287 \cdot 300,15} = 3,512$$
 кг  
 т.к. 1 МПа равен 102 м вод.ст., то давление воды составляет  
 $p_{2и} = H/10^2 = 0,294 \cdot 10^6$  Па  
 Давление воздуха в баллоне и цистерне после их соединения:  
 $p_2 = p_{2и} + B = 0,294 \cdot 10^6 + 1000 \cdot 10^2 = 0,394 \cdot 10^6$  Па

Масса остаточного воздуха в баллоне

$$M_{\text{ост}} = \frac{p_{2a} \cdot V}{R \cdot T_2} = \frac{0,394 \cdot 10^6 \cdot 25 \cdot 10^{-3}}{287 \cdot 278,15} = 0,123 \text{ кг}$$

Масса воздуха в цистерне:

$$M_{\text{ц}} = M - M_{\text{ост}} = 3,512 - 0,123 = 3,388 \text{ кг}$$

Объем цистерны, освобожденный от воды:

$$V = \frac{M_{\text{ц}} \cdot R \cdot T_2}{p_{2a}} = \frac{3,388 \cdot 287 \cdot 278,15}{0,394 \cdot 10^6} = 0,686 \text{ м}^3$$

**1.34.** Кислород объемом  $0,2 \text{ м}^3_{\text{н}}$  находится в сосуде вместимостью  $1500 \text{ см}^3$ . Определить показания манометра (в  $\text{кгс/см}^2$ ), измеряющего давление в этом сосуде, если температура газа  $37 \text{ }^\circ\text{C}$ . Атмосферное давление  $1013 \text{ гПа}$ .

**Ответ:**  $p_{\text{изб}} = 155,5 \text{ кгс/см}^2$

**1.35.** В барокамере объемом  $8 \text{ м}^3$  находился воздух при температуре  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  и избыточном давлении  $5 \text{ кПа}$ . Компрессор, всасывающий  $0,2 \text{ м}^3/\text{мин}$  атмосферного воздуха при температуре  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  и давлении  $100 \text{ кПа}$ , сжимал и подавал этот воздух в барокамеру, в результате чего избыточное давление в ней возросло до  $30 \text{ кПа}$ , а температура повысилась до  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ . Определить время работы компрессора.

**Ответ:**  $\tau = 18,1 \text{ мин}$

**1.36.** В баллоне автомата для газированной воды находится  $\text{CO}_2$ . После израсходования всей жидкой фазы давление в баллоне резко падает, и он подлежит замене. Определить массу газообразного  $\text{CO}_2$ , остающегося в сменяемом баллоне. Вместимость баллона  $50 \text{ л}$ , давление газа (по манометру)  $1,5 \text{ кгс/см}^2$ , температура окружающего воздуха  $27 \text{ }^\circ\text{C}$ . Атмосферное давление  $971 \text{ гПа}$ .

**Ответ:**  $M = 0,215 \text{ кг}$

**1.37.** До какого избыточного давления нужно заполнить криптоном ( $\mu = 83,8 \text{ кг/кмоль}$ ) сферический сосуд из нержавеющей стали массой  $558 \text{ г}$  и с внутренним диаметром  $100 \text{ мм}$ , чтобы он произвольно плавал (не тонул и не всплывал) в воде при температуре  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  и нормальном атмосферном давлении? Плотность стали принять  $7850 \text{ кг/м}^3$ .

**Ответ:**  $p_{\text{изб}} = 1,877 \text{ МПа}$

**1.38.** Масса пустого баллона для гелия вместимостью  $50 \text{ л}$  равна  $70 \text{ кг}$ . Какова будет масса баллона с гелием, если при  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  баллон наполняют газом до давления  $12 \text{ МПа}$ ? Как изменится давление гелия, если баллон внести в помещение, где температура  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ?

**Ответ:**  $M = 71 \text{ кг}; p_2 = 12,6 \text{ МПа}$

**1.39.** Электрическая лампочка накаливания заполнена криптоном, причем вакуум в колбе при температуре среды  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $V = 1013 \text{ гПа}$  составляет  $267 \text{ гПа}$ . После включения лампочки температура в сферической части колбы устанавливается равной  $160 \text{ }^\circ\text{C}$ , а в цилиндрической  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ . Найти давление, которое будет в колбе при установившемся режиме, если объем сферической части колбы  $90 \text{ см}^3$ , цилиндрической  $15 \text{ см}^3$ .

**Ответ:**  $p = 0,105 \text{ МПа}$

**1.40.** Определить подъемную силу, действующую на заполненный гелием сферический зонд диаметром 10 м при температуре воздуха 25 °С и атмосферном давлении 98 кПа. Избыточное давление в зонде составляет 2 кПа. Массой и объёмом материала оболочки пренебречь.

**Ответ:**  $F=6063$  Н

**1.41.** Чему будет равна подъемная сила, действующая на зонд (см. условие задачи 1.40), если он попадет в слой воздуха с давлением 20 кПа и температурой -30 °С? Деформацией оболочки и изменением ускорения свободного падения пренебречь. Считать, что температура гелия совпадает с температурой наружного воздуха, а наличие предохранительного клапана обеспечит сброс избыточного давления до уровня 8 кПа.

**Ответ:**  $F=1425$  Н

**1.42.** Температура водорода равна -20 °С. При каком давлении его плотность будет равна плотности гелия, находящимся при давлении 0, 2 МПа и температуре 50 °С?

**Ответ:**  $p=0,311$  МПа

**1.43.** Определить диаметр воздуховода для подачи воздуха в количестве 10 000 кг/ч при абсолютном давлении 1027 гПа, если температура этого воздуха 17 °С. Скорость движения воздуха в воздуховоде 10 м/с.

<p><b>Дано:</b>  <math>M=10000</math> кг/ч  <math>t_b=17</math> °С  <math>p_a=1027</math> гПа  <math>w=10</math> м/с</p>	<p><b>Решение:</b>            Объемный расход воздуха определим из уравнения состояния</p> $V = \frac{MRT}{p} = \frac{10000 \cdot 287 \cdot 290}{1,027 \cdot 10^5} = 8104 \text{ м}^3/\text{кг};$ <p>с другой стороны, объемный расход равен</p> $V = fw,$ <p>где <math>f</math> – площадь поперечного сечения воздуховода;  <math>w</math> – скорость движения воздуха</p> $V = \frac{w\pi D^2}{4}$ $D = \sqrt{\frac{4V}{\pi w}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 8104}{\pi \cdot 10 \cdot 3600}} = 0,536 \text{ м}$
<p><math>D=?</math></p>	

**1.44.** Скорость движения перегретого пара аммиака во всасывающем трубопроводе холодильной машины 4,8 м/с. Внутренний диаметр трубопровода 100 мм. Давление пара 0,19 МПа, температура -13°С. Определить массовый расход пара аммиака, условно полагая, что в этом состоянии он подчиняется законам идеальных газов.

**Ответ:**  $M=0,056$  кг/с

**1.45.** Давление гелия 1 МПа. При какой температуре его плотность будет втрое меньше плотности хладагента R125, находящимся при следующих условиях: давление 80 кПа, температура 100 °С?

**Ответ:**  $t=193,1$  °С

**1.46.** Поршневой компрессор всасывает воздух в количестве  $4 \text{ м}^3/\text{мин}$  при температуре  $17 \text{ }^\circ\text{C}$  и атмосферном давлении  $100 \text{ гПа}$  и нагнетает его в резервуар, объем которого равен  $10 \text{ м}^3$ . За сколько минут компрессор поднимет давление в резервуаре до  $0,9 \text{ МПа}$ , если температура в нем будет оставаться постоянной? Начальное давление воздуха в резервуаре равняется атмосферному, а температура его также  $17 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Ответ:**  $\tau=20 \text{ мин}$

**1.47.** Условно полагая, что перегретый пар R22 подчиняется законам идеальных газов, определить, не превышает ли скорость его движения в нагнетательном трубопроводе холодильной машины допустимое значение ( $15 \text{ м/с}$ ). Давление пара  $0,8 \text{ МПа}$ , температура  $67 \text{ }^\circ\text{C}$ , массовый расход  $3,85 \text{ кг/с}$ . Диаметр трубопровода  $100 \text{ мм}$ . Молекулярная масса R22  $86,48 \text{ кг/кмоль}$ .

**Ответ:**  $w=20 \text{ м/с}$ , что превышает допустимое значение

**1.48.** Какова масса груза, который может поднять воздушный шар объемом  $10 \text{ м}^3$  при температуре  $27 \text{ }^\circ\text{C}$  и давлении  $1000 \text{ гПа}$ , если он заполнен гелием?

**Ответ:** Масса, которую может поднять шар:  $m=10,03 \text{ кг}$

**1.49.** Определить, является ли молекула кислорода действительно двухатомной, если известно, что в объеме  $5 \text{ л}$  при температуре  $77 \text{ }^\circ\text{C}$  и давлении  $218,23 \text{ кПа}$  находится  $12 \text{ г}$  кислорода. Чему равно давление газа, если бы молекулы кислорода состояли из трех атомов (озон  $\text{O}_3$ )?

<p><b>Дано:</b>  <math>V=5 \text{ л}</math>  <math>t_{\text{в}}=77 \text{ }^\circ\text{C}</math>  <math>p_{\text{а}}=218,23 \text{ кПа}</math>  <math>m=12 \text{ г}</math></p>	<p><b>Решение:</b>  Молекулярную массу кислорода определим из уравнения Клапейрона-Менделеева</p> $\mu = \frac{8314mT}{pV} = \frac{8314 \cdot 0,012 \cdot 350}{218230 \cdot 0,005} = 32 \text{ кг/кмоль}$ <p>Так как атомная масса кислорода равна 16, заключаем, что молекула кислорода состоит из двух атомов, в случае озона давление равно:</p> $p = \frac{mRT}{\nu} = \frac{0,012 \cdot 8314 \cdot 350}{48 \cdot 0,005} = 145 \text{ кПа}$
<p><math>\mu, p=?</math></p>	

**1.50.** Найти объем одного киломоля азота, находящегося при температуре  $290 \text{ К}$  и давлении  $10 \text{ МПа}$ . Решение осуществить, используя уравнения Клапейрона — Менделеева и Ван-дер-Ваальса. Полученные данные сравнить.

Постоянные в уравнении Ван-дер-Ваальса для азота имеют значения:  $a=1,36 \cdot 10^5 \text{ Н} \cdot \text{м}^4/\text{кмоль}^2$ ;  $b=0,0385 \text{ м}^3/\text{кмоль}$ .

<p><b>Дано:</b>  <math>t_{\text{в}}=290 \text{ К}</math>  <math>p=10 \text{ МПа}</math>  <math>a=1,36 \cdot 10^5 \text{ Н} \cdot \text{м}^4/\text{кмоль}^2</math>  <math>b=0,0385 \text{ м}^3/\text{кмоль}</math></p>	<p><b>Решение:</b>  Из уравнения Клапейрона-Менделеева</p> $V_{\mu} = \frac{\mu RT}{p} = \frac{8314 \cdot 290}{10 \cdot 10^6} = 0,241 \text{ м}^3/\text{кмоль}$ <p>Из уравнения Ван-дер-Ваальса</p> $V_{\mu} = \frac{8314T}{p + \frac{a}{V_{\mu}^2}} + b$
<p><math>V_{\mu}=?</math></p>	

В первом приближении используем в правой части этого уравнения выражение  $V_{\mu}$ , найденное из уравнения Клапейрона-Менделеева

$$(V_{\mu}) = \frac{8314 \cdot 290}{10^7 + \frac{1,36 \cdot 10^5}{0,2411^2}} + 0,0385 = 0,234 \text{ м}^3/\text{кмоль}$$

Найденное значение снова используем в уравнении Ван-дер-Ваальса. Подобную операцию будем повторять до тех пор, пока  $(V_{\mu})_n$  не совпадет  $(V_{\mu})_{n-1}$ . Найденное методом последовательных приближений значение  $(V_{\mu}) = 0,230 \text{ м}^3/\text{кмоль}$ ; оно отличается от полученного из уравнения Клапейрона-Менделеева на 4,6%

**1.51.** В аппарате для очистки газа от пыли пузырьки проходят через слой воды. При этом объем их увеличивается по мере приближения к поверхности воды. Определить, на какой глубине диаметр пузырьков в 1,1 раза меньше, чем у поверхности. Давление газа над поверхностью воды 1000 гПа.

**Ответ:**  $h=3,37 \text{ м}$

**1.52.** Воздух в открытом сосуде нагревают от температуры 17 °С до температуры 600 °С, затем, герметически закрыв сосуд, охлаждают воздух до первоначальной температуры. Определить плотность воздуха при температуре 600 °С и после охлаждения. Плотность воздуха в нормальных условиях 1,3 кг/м<sup>3</sup>.

**Ответ:**  $\rho_2=0,407 \text{ кг/м}^3$

**1.53.** Оболочка аэростата заполняется газом не полностью. По мере подъема аэростата атмосферное давление убывает, и оболочка расширяется. На какой высоте газ займет весь объем оболочки, равной 600 м<sup>3</sup>, если она была заполнена гелием объемом 500 м<sup>3</sup> при давлении 10<sup>5</sup> Па? Атмосферное давление убывает вблизи земли на 133 Па при подъеме на каждые 11 м. Температуру считать постоянной, не зависящей от высоты.

**Ответ:**  $H=1378 \text{ м}$

## Глава 2. Первый закон термодинамики

Первый закон термодинамики является частным случаем всеобщего закона сохранения и превращения энергии. Этот закон устанавливает эквивалентность механической и тепловой энергии в процессах их взаимных превращений. Для случая, когда внутренняя энергия в процессе не изменяется, справедливо равенство

$$Q = L, \quad (2.1)$$

где  $Q$  – количество теплоты, превращенной в работу;  $L$  – работа, полученная от теплоты.

Количества теплоты и работы измеряются в одних и тех же единицах – джоулях. Джоуль (Дж) как единица измерения механической работы (энергии) представляет собой работу, совершаемую силой, равной 1 Н, на пути в 1 м, когда направление силы совпадает с направлением перемещения тела.

Так как за единицу работы принят джоуль (Дж), то единицей мощности будет являться джоуль в секунду (Дж/с). Эту единицу называют ваттом (Вт). Обычно применяют более крупные единицы энергии (работы) и мощности: килоджоуль (кДж), киловатт (кВт), мегаватт (МВт) и т.д. В технике также используется внесистемная единица измерения энергии – киловатт-час (кВт·ч):  $1 \text{ кВт}\cdot\text{ч} = 1000 \text{ Дж/с} \cdot 3600 \text{ с} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж} = 3,6 \text{ МДж}$ .

Соотношения между различными единицами энергии и мощности приведены в таблицах 2.1, 2.2.

Таблица 2.1

Соотношение между единицами энергии

Наименование единицы	Дж	кгс·м	кал	ккал	кВт·ч	ft·lb·f
Джоуль	1	0,102	0,239	$2,39 \cdot 10^{-4}$	$2,78 \cdot 10^{-7}$	0,7376
Килограмм-сила-метр	9,8076	1	2,343	$2,343 \cdot 10^{-3}$	$2,72 \cdot 10^{-6}$	7,233
Калория	4,1868	0,42686	1	$10^{-3}$	$1,16 \cdot 10^{-6}$	3,088
Килокалория	$4,1868 \cdot 10^3$	$4,286 \cdot 10^2$	$10^3$	1	$1,16 \cdot 10^{-3}$	$3,088 \cdot 10^3$
Киловатт-час	$3,6 \cdot 10^6$	$3,67 \cdot 10^5$	$8,6 \cdot 10^5$	$8,6 \cdot 10^2$	1	$2,653 \cdot 10^6$
Фут-фунт-сила	1,356	0,138	0,325	$3,25 \cdot 10^{-4}$	$3,76 \cdot 10^{-7}$	1

Таблица 2.2

Соотношение между единицами мощности

Наименование единицы	Ватт	кгс·м/с	Кал/с	ft·lb·f/s	л.с.
Ватт	1	0,102	0,239	0,7376	$1,36 \cdot 10^{-3}$
Килограмм-сила-метр в секунду	9,8076	1	2,343	7,233	$1,33 \cdot 10^{-2}$
Калория в секунду	4,1868	0,427	1	3,088	$5,69 \cdot 10^{-3}$
Фут-фунт-сила в секунду	1,3558	0,138	0,3246	1	$1,84 \cdot 10^{-2}$
Лошадиная сила	736	75	175,5	542,5	1

Аналитическое выражение первого закона термодинамики в дифференциальной форме для 1 кг рабочего тела имеет вид

$$dq = du + dl . \quad (2.2)$$

Первый закон можно формулировать следующим образом: *часть теплоты, сообщаемой телу, расходуется на изменение внутренней энергии, а часть – на эквивалентную внешнюю работу.* Так как теплота и работа являются функциями процесса, а внутренняя энергия – функцией состояния, то после интегрирования уравнение будет иметь вид

$$q = \Delta u + l \quad (2.3)$$

или для произвольной массы рабочего тела  $M$  (кг)

$$Q = \Delta U + L . \quad (2.4)$$

Величина работы расширения для 1 кг рабочего тела определяется из уравнений

$$\delta l = p dv , \quad (2.5)$$

$$l = \int_{v_1}^{v_2} p dv . \quad (2.6)$$

Изменение внутренней энергии 1 кг идеального газа для любого процесса находят из уравнения

$$du = c_v dT , \quad (2.7)$$

$$\Delta u = c_{vm} (T_2 - T_1), \quad (2.8)$$

где  $c_{vm}$  – средняя массовая теплоемкость при постоянном объеме в интервале температур от  $T_1$  до  $T_2$ .

В технической термодинамике часто используют сложный параметр энтальпию –

$$h = u + pv. \quad (2.9)$$

Из уравнения следует, что энтальпия является функцией состояния имеет единицу измерения кДж/кг. Продифференцировав уравнение, получим

$$dh = du + pdv + vdp, \quad (2.10)$$

и, так как  $du + pdv = \delta q$ , можно записать

$$\delta q = dh - vdp. \quad (2.11)$$

Уравнение является уравнением первого закона, выраженным через энтальпию. Изменение энтальпии 1 кг идеального газа определяется из уравнения

$$dh = c_p dT, \quad (2.12)$$

$$\Delta h = c_{pm} (T_2 - T_1), \quad (2.13)$$

где  $c_{pm}$  – средняя массовая теплоёмкость при постоянном давлении в интервале температур от  $T_1$  до  $T_2$ .

Интегрируя уравнение при  $p=const$ , получим

$$q_p = h_2 - h_1. \quad (2.14)$$

Таким образом, количество теплоты в процессе с постоянным давлением численно можно определить как разность между энтальпиями в конечном и начальном состояниях.

## Задачи

**2.1.** На какую высоту можно поднять гирию массой 1 кг, если бы для этой цели удалось использовать 50% от количества теплоты, выделившейся в результате сгорания одной спички? Массу спички принять 1 г и теплоту сгорания дерева 16000 кДж/кг.

**Ответ:**  $H=815,5$  м

**2.2.** Какую скорость движения должна иметь свинцовая пуля, чтобы расплавиться при ударе об абсолютно твердое препятствие? Принять температуру пули в момент удара 57 °С, теплоемкость свинца 0,125 кДж/(кг·К), теплоту плавления 21 кДж/кг, температуру плавления 327 °С.

**Ответ:**  $w=381$  м/с

**2.3.** Хватит ли мощности любой гидроэлектростанции земного шара, чтобы нагреть до кипения проходящую через турбину воду? Температуру речной воды считать 20 °С.

<b>Дано:</b> $t_1=20$ °С $t_2=100$ °С	<b>Решение:</b> Для нагревания воды от температуры 20 °С до температуры кипения, каждому килограмму воды, проходящему через турбину, необходимо сообщить количество теплоты, равное $q = c\Delta t = 4,19 \cdot 80 = 335,2$ кДж/кг Если в теплоту преобразовать всю работу, совершаемую падающей водой, т.е. считать, что $q = l = mgh$ То высота падения должна быть равна $h = \frac{l}{mg} = \frac{335,2 \cdot 10^3}{1 \cdot 9,81} = 34170$ м
$h$ –?	

**2.3.** Вода объемом 5 л нагревается опущенным в нее электрокипятильником мощностью 600 Вт. За какое время вода нагреется до кипения, если ее начальная температура 30 °С? Предположить, что потери теплоты в воздух отсутствуют.

**Ответ:**  $\tau=40,7$  мин

**2.4.** До какой температуры от 25 °С можно нагреть 55 л воды в банном баке, опуская в нее 20 кг гранитных булыжников, нагретых до температуры 450 °С (теплоемкость гранита 0,921 кДж/(кг·К))? Испарением воды и теплоемкостью бака можно пренебречь. Как изменится внутренняя энергия воды, если работа расширения мала и ее можно не учитывать?

**Ответ:**  $t=56,7$  °С;  $\Delta U=7245$  кДж

**2.5.** При торможении маховика с помощью тормозных колодок работа против сил трения превращается в теплоту, одна часть (25%) которой рассеивается в воздухе, а остальная – поглощается водой, охлаждающей колодки. Каким должен быть часовой расход воды, поступающей в колодки, если крутящий момент маховика 1,2 кДж, частота вращения 2000 об/мин, а допустимое повышение температуры воды в колодках 40 °С?

<p><b>Дано:</b>  <math>M_{кр} = 1,2</math> кДж  <math>n = 2000</math> об/мин  <math>t = 40</math> °С  <hr/> <math>M</math> –?</p>	<p><b>Решение:</b>          Мощность на валу маховика  <math display="block">N = \frac{2\pi n M_{кр}}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 2000 \cdot 1200}{60} = 251500 \text{ Вт}</math>         Теплота охлаждающей колодки, поглощенная водой, равна  <math>Q = 0,75N = 0,75 \cdot 251500 = 188500 \text{ Вт}</math>         Часовой расход воды определим из уравнения  <math display="block">M = \frac{Q}{c\Delta t} = \frac{188,5 \cdot 10^3}{4,19 \cdot 10^3 \cdot 40} = 1,125 \text{ кг/с}</math></p>
---	--

**2.6.** Движущиеся стальные части механизма массой 30 кг из-за плохой смазки нагреваются в течение 0,5 ч на 40 К. Найти потерю мощности в механизме из-за трения. Теплоемкость стали 0,46 кДж/(кг·К).

**Ответ:**  $\Delta N = 0,307$  кВт

**2.7.** В цилиндре с подвижным поршнем адиабатно сжимается водород. Определить удельную работу процесса сжатия, если температура водорода повысится от 15 до 120 °С.

**Ответ:**  $l = -1067$  кДж/кг

**2.8.** Определить коэффициент полезного действия автомобильного двигателя мощностью 73,6 кВт, если расход бензина 12 кг/ч. Теплоту сгорания бензина принять равной 40000 кДж/кг.

**Ответ:**  $\eta = 55,2\%$

**2.9.** Какое количество теплоты пойдет на совершение внешней работы, а какое на изменение внутренней энергии, если за рабочее тело принять стальной стержень длиной 1 м, сечением 50 см<sup>2</sup> и нагревать его от 20 до 120 °С? На стержне находится груз массой 1000 кг. Плотность стали 7800 кг/м<sup>3</sup>, теплоемкость 0,46 кДж/(кг·К), коэффициент линейного расширения 0,00001 1/К.

<p><b>Дано:</b>  <math>h = 1</math> м  <math>f = 50</math> см<sup>2</sup>  <math>t_1 = 20</math> °С  <math>t_2 = 120</math> °С  <math>m = 1000</math> кг  <math>\rho = 7800</math> кг/м<sup>3</sup>  <math>c = 0,46</math> кДж/(кг·К)  <math>\beta = 0,00001</math> 1/К  <hr/> <math>L</math> –?</p>	<p><b>Решение:</b>          Определяем массу стального стержня  <math>M = V\rho = hf\rho = 1 \cdot 50 \cdot 10^{-4} \cdot 7800 = 39 \text{ кг}</math>         Количество теплоты, затраченное на нагревание стержня, определяем из уравнения  <math>Q = Mc\Delta T = 39 \cdot 0,46 \cdot 100 = 1794 \text{ кДж}</math>         Изменение длины стержня при нагревании  <math>\Delta h = h\beta\Delta T = 1 \cdot 10^{-5} \cdot 100 = 0,001 \text{ м}</math>         Работа, совершенная стержнем при подъеме груза массой 1000 кг,  <math>L = mg\Delta h = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,001 = 9,81 \text{ Дж}</math>         Таким образом, на совершение внешней работы пойдет 0,0005% подведенной теплоты</p>
--	--

**2.10.** В котельной электростанции за 5 ч работы сожжено 2 т природного газа с теплотой сгорания 32000 кДж/кг. Определить количество выработанной энергии и мощность электростанции, если КПД станции 25%.

**Ответ:**  $Q = 160 \cdot 10^3$  МДж;  $N = 8880$  кВт

**2.11.** Определить изменение внутренней энергии  $10 \text{ м}_\text{н}^3$  воздуха, если температура его понижается от  $35$  до  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Ответ:**  $\Delta U = -185,4 \text{ кДж}$

**2.12.** Для нагревания  $1000 \text{ г}$  воды при нормальном атмосферном давлении от  $10$  до  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  к ней нужно подвести  $41860 \text{ Дж}$  теплоты. При этом удельный объем воды увеличивается от  $1,0003$  до  $1,0018 \text{ см}^3/\text{г}$ . Определить, какая часть теплоты тратится на изменение внутренней энергии воды, какая – на внешнюю работу.

**Ответ:**  $L = 0,152 \text{ Дж}$ ;  $\Delta U = 41860 \text{ Дж}$

**2.13.** Азот сжимают так, что его температура увеличивается от  $0$  до  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ , а работа процесса оказывается равной изменению внутренней энергии азота. Найти удельную работу процесса.

**Ответ:**  $q = 2,452 \text{ кДж/кг}$

**2.14.** Газ массой  $1,5 \text{ кг}$  находится в цилиндре с подвижным поршнем. К газу подводится теплота  $20 \text{ кДж}$ , и он совершает работу, равную  $26 \text{ кДж}$ . Найти изменение удельной внутренней энергии газа.

**Ответ:**  $\Delta u = -4 \text{ кДж/кг}$

**2.15.** На сжатие  $1 \text{ кмоль}$  двухатомного газа затрачена работа, равная  $100 \text{ кДж}$ . Какое количество теплоты необходимо отвести от газа, чтобы его температура повысилась не более чем на  $2 \text{ К}$ ?

**Ответ:**  $\Delta u = 41,86 \text{ кДж/кмоль}$

**2.16.** Изотермически расширяясь, водород массой  $4 \text{ кг}$  совершает работу в  $1000 \text{ кг}\cdot\text{м}$ . Определить удельную теплоту, сообщаемую газу в этом процессе.

**Ответ:**  $q = 2,452 \text{ кДж/кг}$

**2.17.** При изобарном расширении воздуха массой  $5 \text{ кг}$  его температура повысилась от  $-20$  до  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ . Определить изменение удельной энтальпии воздуха.

**Ответ:**  $\Delta h = 12 \text{ кДж/кг}$

**2.18.** Определить внутреннюю энергию кислорода при температуре  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ , если его энтальпия при этих условиях равна нулю.

**Ответ:**  $u = -7100 \text{ Дж/кг}$

**2.19.** К окиси углерода массой  $12 \text{ кг}$  подведена теплота ( $250 \text{ кДж}$ ), в результате чего газом совершена работа  $0,1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ . Определить, как изменилась температура газа.

**Ответ:**  $\Delta T = 12,25 \text{ К}$

**2.20.** На изобарное сжатие азота массой  $2,5 \text{ кг}$  была затрачена работа, равная  $15 \text{ кДж}$ . При этом температура газа понизилась на  $20 \text{ К}$ . Чему равно изменение удельной энтальпии азота в этом процессе? Изохорную теплоемкость азота принять равной  $0,75 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ .

**Ответ:**  $\Delta h = -21 \text{ кДж/кг}$

**2.21.** Перегретый пар R22 расширился по изобаре  $p = 0,3 \text{ бар}$  так, что его удельный объем увеличился от  $0,8$  до  $1,2 \text{ м}^3/\text{кг}$ . При этом температура повысилась от  $-23$  до  $97 \text{ }^\circ\text{C}$ . В начальном состоянии удельная энтальпия пара

700 кДж/кг. Определить удельную энтальпию в конечном состоянии. Перегретый пар хладона условно рассматривать как идеальный газ. Считать, что его изохорная теплоемкость в этом процессе 0,57 кДж/(кг·К).

**Ответ:**  $h_2=780,4$  кДж/кг

**2.22** Температура воздуха в комнате в результате включения нагревателя повысилась от  $T_1$  до  $T_2$ . Давление не изменилось и осталось равным атмосферному. Найти изменение внутренней энергии воздуха в комнате.

<b>Дано:</b>	<b>Решение:</b>
$T_1$	Если за начало отсчета внутренней энергии принять при
$T_2$	$T_0=0$ К $U_0=0$ ,
$p=const$	То можно записать, что внутренняя энергия воздуха в комнате:
$\Delta U$ –?	В начальном состоянии $U_1 = M_1 c_v (T_1 - T_0)$
	В конечном состоянии $U_2 = M_2 c_v (T_2 - T_0)$
	Масса воздуха в комнате в процессе нагревания изменяется. По уравнению состояния
	$M_1 = \frac{pV}{RT_1}$ ; $M_2 = \frac{pV}{RT_2}$
	Изменение внутренней энергии в процессе нагревания
	$\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{pV}{R} \left( \frac{1}{T_2} c_v (T_2 - T_0) - \frac{1}{T_1} c_v (T_1 - T_0) \right) = 0$

### Глава 3. Процессы изменения состояния идеального газа

Термодинамическим процессом называется ряд последовательных изменений термодинамических состояний газа в результате взаимодействия с внешней средой. Каждый термодинамический процесс осуществляется в определенных условиях.

К основным термодинамическим процессам относят изохорный, протекающий при постоянном объеме; изобарный, протекающий при постоянном давлении; изотермический, протекающий при постоянной температуре; адиабатный, протекающий без теплообмена с окружающей средой. Эти процессы являются частными случаями политропного процесса, в котором показатель степени  $n$  в уравнении  $p v^n = \text{const}$  может принимать любое числовое значение (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Показатель политропы	Уравнение процесса		Название процесса
$n = 0$	$p v^0 = \text{const}$	$p \cdot 1 = \text{const}$	Изобарный
$n = \infty$	$p^{\frac{1}{n}} v = \text{const}$	$p^0 v = 1 \cdot v = \text{const}$	Изохорный
$n = 1$	$p v^1 = \text{const}$	$p v = \text{const}$	Изотермический
$n = k$	$p v^k = \text{const}$	–	Адиабатный

Изображение процесса в рабочей (а) и тепловой (б) диаграммах (рис. 3.1)

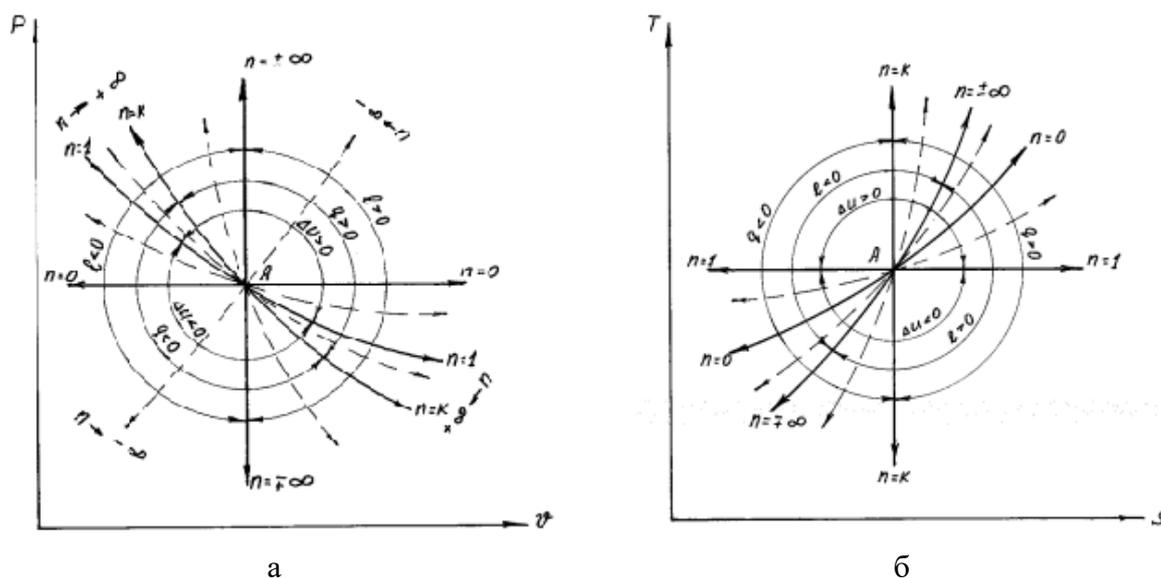


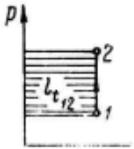
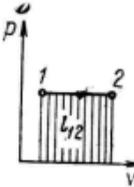
Рис. 3.1. Изображение некоторых политропных процессов

Зависимости между параметрами в начальном и конечном состоянии представлены в табл. 3.2. Уравнения для расчетов процессов идеального газа представлены в табл. 3.3.

Таблица 3.2

Вид процесса	Уравнение процесса	Изображение процесса в p-v диаграмме	Зависимость между параметрами в начальном и конечном состоянии	Изменение внутренней энергии	Изменение энтальпии	Изменение энтропии
Изохорный	$v = \text{const}$		$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$	$\Delta u = c_v \int_{T_1}^{T_2} (T_2 - T_1)$	$\Delta h = c_v \int_{T_1}^{T_2} (T_2 - T_1) + v(p_2 - p_1)$	$\Delta s = c_v \int_{T_1}^{T_2} \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$
Изобарный	$p = \text{const}$		$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}$	$\Delta u = c_p \int_{T_1}^{T_2} (T_2 - T_1) - p(v_2 - v_1)$	$\Delta h = c_p \int_{T_1}^{T_2} (T_2 - T_1)$	$\Delta s = c_p \int_{T_1}^{T_2} \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$
Изотермический	$T = \text{const}$		$\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1}$	$\Delta u = 0$	$\Delta h = 0$	$\Delta s = R \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) = R \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right)$
Адиабатный	$pv^k = \text{const}$		$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^k; \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{k-1};$ $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{k-1}{k}}$	$\Delta u = c_v \int_{T_1}^{T_2} (T_2 - T_1)$	$\Delta h = c_p \int_{T_1}^{T_2} (T_2 - T_1)$	$\Delta s = 0$
Политропный	$pv^n = \text{const}$		$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^n; \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{n-1};$ $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{n-1}{n}}$	$\Delta u = c_v \int_{T_1}^{T_2} (T_2 - T_1)$	$\Delta h = c_p \int_{T_1}^{T_2} (T_2 - T_1)$	$\Delta s = \int_1^2 \frac{\delta q}{T} = c_n \int_{T_1}^{T_2} \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$

Таблица 3.3

Вид процесса	Уравнение процесса	Изображение процесса в p-v диаграмме	Зависимость между параметрами в начальном и конечном состоянии	Теплота процесса	Работа процесса
Изохорный	$v = \text{const}$		$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$	$q_{1-2} = \Delta u =$ $= c_v \int_{T_1}^{T_2} (T_2 - T_1)$	$l_{1-2} = 0$
Изобарный	$p = \text{const}$		$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}$	$q_{1-2} = \Delta h =$ $= c_p \int_{T_1}^{T_2} (T_2 - T_1)$	$l_{1-2} = R(T_2 - T_1)$
Изотермический	$T = \text{const}$		$\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1}$	$q_{1-2} = RT \ln \left( \frac{v_2}{v_1} \right) =$ $= RT \ln \left( \frac{p_1}{p_2} \right)$	$l_{1-2} = RT \ln \left( \frac{v_2}{v_1} \right) = RT \ln \left( \frac{p_1}{p_2} \right)$
Адиабатный	$pv^k = \text{const}$		$\frac{p_1}{p_2} = \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^k$ ; $\frac{T_1}{T_2} = \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^{k-1}$ ; $\frac{T_1}{T_2} = \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}}$	$q_{1-2} = 0$	$l_{1-2} = -\Delta u$ ; $l_{1-2} = c_v \int_{T_1}^{T_2} (T_1 - T_2)$ ; $l_{1-2} = \frac{RT_1}{k-1} \left( 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right) =$ $= l = \frac{R}{k-1} (T_1 - T_2)$
Политропный	$pv^n = \text{const}$		$\frac{p_1}{p_2} = \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^n$ ; $\frac{T_1}{T_2} = \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^{n-1}$ ; $\frac{T_1}{T_2} = \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{n-1}{n}}$	$q_{1-2} = c_v \frac{n-k}{n-1} (T_2 - T_1)$	$l_{1-2} = \frac{RT_1}{n-1} \left( 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right) =$ $= l = \frac{R}{n-1} (T_1 - T_2)$

## Задачи

**3.1.** В баллоне вместимостью 240 л находится воздух при абсолютном давлении 1 МПа и температуре 50 °С. Определить конечное давление, количество подведенной теплоты и изменение энтропии при повышении температуры воздуха до 150 °С.

**Ответ:**  $p_2=1,31$  МПа;  $Q=187,4$  кДж;  $\Delta S=0,506$  кДж/К

**3.2.** Манометр, присоединенный к баллону с кислородом, показывает 600 кПа в то время, когда баллон находится на улице при температуре наружного воздуха -17 °С. Каким будет показание манометра после того, как баллон перенесут в помещение, температура воздуха в котором 20 °С, и кислород нагреется до этой температуры? Атмосферное давление 1000 гПа

**Ответ:**  $p_{\text{ман}}=700$  кПа

**3.3.** Аммиак поступает из испарителя холодильной машины в компрессор. В трубопроводе, соединяющем испаритель и компрессор, аммиак нагревается от -10 до 0 °С. Считая процесс нагревания аммиака изобарным и рассматривая аммиак как идеальный газ, определить, как изменится скорость его движения в конце трубопровода.

**Ответ:**  $w_2/w_1=1,038$

**3.4.** Воздух охлаждается в водяном охладителе системы кондиционирования от 35 до 25 °С при постоянном давлении. Расход воздуха 1800 м<sup>3</sup>/ч. Определить расход охлаждающей воды, если она нагревается на 6 °С.

**Ответ:**  $M_{H_2O}=0,258$  кг/с

**3.5.** Во сколько раз можно уменьшить объем аммиака в процессе изотермического сжатия при 100 °С, если в этом процессе затратить работу, равную 166,8 кДж/кг.

**Ответ:**  $v_1/v_2=2,5$

**3.6.** В процессе изотермического сжатия кислорода начальным объемом 0,5 м<sup>3</sup> при температуре 227 °С от него отводится теплота, равная 440 кДж. Начальное давление газа 0,6 МПа. Определить конечные давление и объем газа.

**Ответ:**  $p_2=2,6$  МПа;  $V_2=0,115$  м<sup>3</sup>

**3.7.** В компрессоре холодильной машины перегретый пар аммиака адиабатно сжимается, в результате чего объем уменьшается в 6 раз. Начальная температура аммиака -5 °С. Определить конечную температуру аммиака, условно полагая, что его перегретый пар в этом состоянии подчиняется законам идеальных газов. Принять  $\kappa=1,3$ .

**Ответ:**  $T_2=458,8$  К

**3.8.** До какого давления нужно адиабатно сжать смесь воздуха и паров бензина, чтобы в результате повышения температуры наступило самовоспламенение смеси? Начальные параметры:  $p_1=100$  кПа,  $t_1=27$  °С. Температура воспламенения смеси  $t_2=550$  °С,  $\kappa=1,39$ .

**Ответ:**  $p_2=3,64$  МПа

**3.9.** В компрессоре установки для получения сухого льда происходит сжатие диоксида углерода от  $p_1=2,4$  МПа до  $p_2=6,8$  МПа. Начальная температура газа  $t_1=-10$  °С. Обычно полагают, что сжатие происходит адиабатно ( $n=k=1,3$ ). Применив компрессор с охлаждающей водяной рубашкой, показатель политропы можно уменьшить до  $n=1,2$ . Определить температуру в конце сжатия для обоих случаев и сравнить работу обоих компрессоров.

**Ответ:**  $T_{2a}=334,5$  К,  $T_{2n}=313$  К,  
 $l_a=-45,02$  кДж/кг,  $l_n=-47,22$  кДж/кг

**3.10.** Вентилятор системы кондиционирования забирает наружный воздух при давлении 1013 гПа и температуре 17 °С. После вентилятора давление возрастает на 20 мм вод.ст., а удельный объем воздуха уменьшается в 1,02 раза. Определить, как изменяется температура воздуха после вентилятора вследствие его политропного сжатия.

**Ответ:**  $T_2/T_1=0,999$

**3.11.** Политропный процесс расширения азота от нормальных физических условий происходит так, что подводимая теплота поровну расходуется на увеличение внутренней энергии газа и на работу процесса. Определить показатель политропы и изменение удельной энтропии газа, если его конечный удельный объем равен 3,16 м<sup>3</sup>/кг. Изобразить процесс в рабочей и тепловой диаграммах.

**Ответ:**  $n=0,6$ ;  $\Delta s=0,82$  кДж/(кг К)

**3.12.** Компрессор холодильной машины всасывает сильно перегретый пар R13 при  $p_1=1$  бар и  $t_1=-50$  °С и сжимает его до давления 10 бар. Условно полагая, что к перегретому пару R13 применимы законы идеальных газов, и считая показатель политропы в этом процессе равным 1,4, определить температуру паров R13 в конце сжатия.

**Ответ:**  $T_2=430,8$  К

**3.13.** Компрессор всасывает воздух при давлении 0,1 МПа и сжимает его до 0,5 МПа. Часовая производительность компрессора 1000 м<sup>3</sup>/ч сжатого воздуха. Определить теоретическую мощность двигателя компрессора. Как изменяется скорость движения воздуха в нагнетательном патрубке по сравнению со всасывающим, если их проходные сечения одинаковы? Процесс сжатия изотермический.

**Ответ:**  $N=223$  кВт; скорость уменьшится в 5 раз

**3.14.** В двухступенчатом компрессоре воздух в количестве 5000 м<sup>3</sup>/ч сжимается. При этом давление изменяется от 0,1 до 4,0 МПа. Начальная температура воздуха 20 °С. После первой ступени воздух охлаждается до начальной температуры в промежуточном водяном охладителе. Определить расход воды в охладителе и рубашках цилиндров компрессора, если температура воды в обоих устройствах повышается на 10 °С. Сжатие воздуха в обеих ступенях происходит по политропе с показателем 1,25. Принять  $c_{pm}=1,01$  и  $c_{vm}=0,72$  кДж/(кг·К).

**Ответ:**  $M_p=0,22$  кг/с;  $M_{ох}=0,52$  кг/с;  $M_{общ}=0,96$  кг/с

**3.15.** Рассчитать двоянный термодинамический процесс 1-2-3 по данным, представленным в таблице. Результаты расчета параметров точек 1, 2 и 3 и характеристик ( $q$ ,  $\Delta u$ ,  $l$ ,  $\Delta s$ ) процессов 1-2 и 2-3 представить в табличной форме. Изобразить процесс 1-2-3 в диаграммах  $p$ - $v$  и  $T$ - $s$ .

№ вар.	Газ	$p_1$ , МПа	$t_1$ , оС	Постоянный параметр в процессе 1-2	Параметр ( $\cdot$ )2	Показатель политропы	Параметр ( $\cdot$ ) 3
1	He	2	-10	$v$	3 МПа	0,8	4 МПа
2	H <sub>2</sub>	3	-20	$p$	30 оС	1,2	100 оС
3	O <sub>2</sub>	2,5	10	$t$	2 м <sup>3</sup> /кг	0,7	0,5 м <sup>3</sup> /кг
4	N <sub>2</sub>	1,4	0	$s$	100 оС	1,7	500 оС
5	воздух	1,6	20	$v$	3 МПа	0,8	-40 оС
6	CO <sub>2</sub>	2,2	30	$p$	-20 оС	0,7	40 оС
7	He	0,8	10	$t$	2 м <sup>3</sup> /кг	1,4	2 кг/м <sup>3</sup>
8	H <sub>2</sub>	0,6	20	$s$	-50 оС	0,6	0 оС
9	N <sub>2</sub>	0,4	40	$p$	3 кг/м <sup>3</sup>	1,6	5 кг/м <sup>3</sup>
10	воздух	2	20	$t$	2 кг/м <sup>3</sup>	0,8	100 оС
11	CO <sub>2</sub>	3	30	$s$	1 МПа	1,4	3 МПа
12	He	2,5	-10	$v$	100 оС	1,8	500 оС
13	H <sub>2</sub>	1,8	-20	$p$	-70 оС	0,7	10 оС
14	O <sub>2</sub>	1,6	50	$t$	8 кг/м <sup>3</sup>	1,2	-50 оС
15	N <sub>2</sub>	1,4	40	$s$	150 оС	0,8	5 м <sup>3</sup> /кг
16	воздух	0,8	60	$v$	0 оС	1,2	300 оС
17	CO <sub>2</sub>	0,6	0	$p$	2 кг/м <sup>3</sup>	0,7	50 оС
18	He	0,2	10	$t$	0,2 кг/м <sup>3</sup>	1,2	40 оС
19	H <sub>2</sub>	5	-20	$s$	0 оС	-2	30 оС
20	O <sub>2</sub>	4	40	$v$	100 оС	-1	150 оС

## Глава 4. Второй закон термодинамики

Второй закон термодинамики устанавливает, что необратимые (самопроизвольные) процессы возможны лишь в том случае, когда в системе нет равновесия, когда, например, в системе имеется разность температур, и что осуществление этих процессов происходит всегда в направлении, приближающем систему к состоянию равновесия. Второй закон исключает возможность создания машины, которая работала бы только в результате подвода теплоты из окружающей среды (вечного двигателя второго рода), и возможность самопроизвольного перехода теплоты от тела с меньшей температурой к телу с большей температурой.

Перенос теплоты от системы с меньшей температурой к системе с более высокой температурой можно осуществить, только затратив работу или эквивалентное количество другой энергии.

Самопроизвольный переход теплоты к системе с меньшей температурой является процессом необратимым, в отличие от обратимых процессов, т. е. таких, которые могут происходить одинаково в обоих направлениях.

Практически все реальные процессы, происходящие в термотрансформаторах энергии, необратимы.

Направление процесса теплообмена системы с окружающей средой, а также направление любых самопроизвольных процессов в изолированной системе характеризуется особым параметром состояния – энтропией, которая является функцией состояния системы. Полный дифференциал энтропии определяют из уравнения

$$dS = \frac{\delta Q}{T}, \quad (4.1)$$

где  $Q$  – количество теплоты, участвующее в квазистатическом процессе теплообмена, Дж;  $T$  – абсолютная температура, при которой происходит процесс, К.

При обратимом переходе системы из одного состояния в другое

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 dS = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}. \quad (4.2)$$

Второй закон не только устанавливает понятие энтропии, но и говорит о том, что в любом реальном процессе  $\Delta S$  изолированной системы должно быть больше нуля.

Математическим выражением второго закона термодинамики является уравнение, которое связывает бесконечно малое количество теплоты, полученной или отданной системой, с бесконечно малым изменением энтропии системы:

$$TdS \geq \delta Q. \quad (4.3)$$

Знак «больше» соответствует необратимым процессам, а знак равенства – обратимым.

Так как согласно первому закону термодинамики

$$\delta Q = dU + pdV,$$

уравнение можно переписать для обратимых процессов следующим образом:

$$TdS = dU + pdV$$

или

$$dS = c_v \frac{dT}{T} + \frac{p}{T} dV. \quad (4.4)$$

Конечное изменение энтропии идеального газа в процессе можно определить с помощью уравнений, полученных путем интегрирования уравнения.

В большинстве термодинамических расчетов абсолютная величина энтропии рабочего тела в том или ином состоянии не представляет практического интереса. Поэтому отсчет значений энтропии можно вести от ее значения в любом состоянии. Для газов принято считать значение энтропии равным нулю при нормальных физических условиях:  $t=0^\circ\text{C}$  и  $p=1013$  гПа.

Максимальную работу, которую способно совершить рабочее тело с параметрами, отличающимися от параметров окружающей среды, можно получить лишь при условии перехода рабочего тела от начального состояния к состоянию среды обратимым путем. При этом максимальная полезная работа меньше максимальной на величину работы вытеснения окружающего воздуха. Максимально полезная работа определяется из уравнения

$$l_{\max \Pi} = u_1 - u_2 - T_{\text{oc}}(s_1 - s_2) - p_{\text{oc}}(v_2 - v_1) \quad (4.5)$$

или, что то же,

$$l_{\max \Pi} = l_{\text{ад}} - l_{\text{из}} - p_{\text{oc}}(v_2 - v_1), \quad (4.6)$$

где  $T_{\text{oc}}$  и  $p_{\text{oc}}$  – температура и давление окружающей среды.

При получении механической работы в тепловых двигателях и холода в холодильных машинах происходят не одиночные процессы, а круговые процессы или циклы. Циклом называют совокупность термодинамических

процессов, после осуществления которых рабочее тело возвращается в исходное состояние.

В соответствии со вторым законом термодинамики прямые циклы, предназначенные для превращения теплоты в механическую работу, могут протекать только при наличии компенсирующего процесса, в этом случае им является передача части теплоты низкотемпературному источнику. Обратные циклы, предназначенные для передачи теплоты с низкого на высокий температурный уровень, могут протекать только при наличии компенсирующего процесса в виде перехода работы в теплоту.

Для любого прямого цикла справедлив следующий тепловой баланс:

$$q_1 = l_{\text{ц}} + |q_2|, \quad (4.7)$$

где  $q_1$  – удельная теплота, полученная рабочим телом от высокотемпературного источника;  $q_2$  – удельная теплота, отданная рабочим телом низкотемпературному источнику;  $l$  – удельная полезная работа цикла.

Степень преобразования теплоты в полезную работу характеризуется термическим коэффициентом полезного действия

$$\eta_t = \frac{l_{\text{ц}}}{q_1} = 1 - \frac{|q_2|}{q_1}. \quad (4.8)$$

Тепловой баланс любого обратного цикла имеет вид

$$|q_1| = q_2 + |l_{\text{ц}}|, \quad (4.9)$$

где  $q_1$  – удельная теплота, отданная рабочим телом высокотемпературному источнику;  $q_2$  – удельная теплота, полученная рабочим телом от низкотемпературного источника (в холодильной машине это удельная холодопроизводительность, т.е. удельная теплота, отнятая рабочим телом от тел, подлежащих охлаждению);  $l$  – удельная, затраченная в цикле работа.

Эффективность обратного цикла, если он осуществляется в холодильной машине, характеризуется холодильным коэффициентом

$$\varepsilon = \frac{q_2}{|l_{\text{ц}}|}, \quad 0 < \varepsilon < \infty \quad (4.10)$$

и, если обратный цикл происходит в тепловом насосе, – отопительным коэффициентом

$$\mu = \frac{|q_1|}{|l_{\text{ц}}|}, \quad 1 < \mu < \infty \quad (4.11)$$

Если для осуществления цикла используется только два источника с постоянными температурами, то циклом–образцом, имеющим наибольший термический коэффициент полезного действия, является прямой обратимый цикл Карно. Для него

$$\eta_{ic} = 1 - \frac{T_2}{T_1}, \quad (4.12)$$

где  $T_1, T_2$  – температуры горячего и холодного источника.

Обратный обратимый цикл Карно также характеризуется наибольшими значениями холодильного и отопительного коэффициентов для двух заданных температур источников

$$\varepsilon_c = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \quad (4.13)$$

и

$$\mu_c = \frac{T_1}{T_1 - T_2}. \quad (4.14)$$

## Задачи

**4.1.** В теплотехнических расчетах обычно не требуются значения абсолютных значений энтропии. Почти всегда можно ограничиться вычислением разности между энтропиями вещества в двух различных состояниях. Исходя из этого, условно принимают энтропию вещества при нормальных условиях ( $p_0=1013$  гПа и  $t=0$  °С) равной нулю, а значения энтропий, отсчитанные от этого произвольно выбранного «нулевого» состояния, называют относительной энтропией или просто энтропией.

Найти энтропию воздуха объемом  $10 \text{ м}_H^3$  при  $200$  °С, если известно, что начальное состояние соответствует нормальным условиям, а процесс изменения состояния протекал: 1) изохорно, 2) изобарно, 3) адиабатно, 4) по политропе с  $n=2$ . Представить все эти процессы в  $T-s$  – диаграмме.

**Ответ:** изохорный –  $s=5,136$  кДж/кг;  
 изобарный –  $s=7,175$  кДж/кг;  
 адиабатный –  $s=0$  кДж/кг;  
 политропный –  $s=3,0976$  кДж/кг

**4.2.** Лед в количестве  $20$  кг с начальной температурой  $-10$  °С помещен в камеру, температура воздуха в которой  $30$  °С. Полагая, что образующаяся при таянии вода нагреется до температуры воздуха, определить увеличение энтропии, происходящее в результате этого процесса. Теплота плавления льда  $335$  кДж/кг. Теплоёмкость льда  $2$  кДж/(кг·К), а воды  $4,19$  кДж/(кг·К).

<p><b>Дано:</b>  <math>m=20</math> кг  <math>t_1=-10</math> °С  <math>t_2=20</math> °С</p>	<p><b>Решение:</b>                  Для нагревания льда, его плавления и нагревания полученной воды от окружающей среды отводится теплота:  <math>Q = m(c_{л}(t_0 - t_1) + q_{пл} + c_{в}(t_2 - t_0))</math>  <math>Q = 20(2 \cdot 10 + 335 + 4,19 \cdot 30) = 9614</math> кДж                  эта теплота отводится при неизменной температуре среды <math>30</math> °С.                  Изменение энтропии среды:  <math>\Delta S_{ср} = -\frac{Q}{T_{ср}} = -\frac{9614}{303} = -31,73</math> кДж/К;                  Изменение энтропии льда и воды  <math>\Delta S_{л.в} = m \left( c_{л} \ln \left( \frac{T_0}{T_1} \right) + \frac{q_{пл}}{T_0} + c_{в} \ln \left( \frac{T_2}{T_0} \right) \right)</math>  <math>\Delta S_{л.в} = 20 \left( 2 \ln \left( \frac{273}{263} \right) + \frac{335}{273} + 4,19 \ln \left( \frac{303}{273} \right) \right) = 34,77</math> кДж/К.                  Изменение энтропии системы  <math>\Delta S_{сист} = \Delta S_{ср} + \Delta S_{л.в} = -31,73 + 34,77 = 3,04</math> кДж/К.</p>
<p><math>\Delta S_{сист} - ?</math></p>	

**4.3.** В двух сосудах содержится идеальный газ при температурах соответственно  $T_1$  и  $T_2$ . Определить изменение энтропии в процессе выравнивания температуры, когда эти сосуды приведены в соприкосновение и происходит теплообмен между газом, находящимся в обоих сосудах, через теплопроводную стенку. Объемы порций газа не изменяются. Количество газа в каждом сосуде  $1$  кмоль.

**Ответ:**  $\Delta S_{\text{сист}} = \mu c_v \ln \left( \frac{(T_1 + T_2)^2}{4 \cdot T_1 \cdot T_2} \right)$

**4.4.** Начальное давление в сосуде с гелием 20,26 МПа. Через неплотность газ медленно вытекает из сосуда. При этом его температура сохраняется равной 20 °С. Каково удельное изменение энтропии газа в этом процессе? Атмосферное давление  $B=0,1$  МПа.

**Ответ:**  $\Delta s = R \ln \left( \frac{p}{B} \right) = 11,03 \text{ кДж}/(\text{кг К})$

**4.5.** Азот расширяется по политропе от давления 2 МПа и температуры 120 °С до давления 0,5 МПа. Конечная температура газа при обратимом ходе процесса составляет 10 °С, при необратимом 20 °С. Считая азот идеальным газом, найти увеличение его энтропии в обратимом процессе и дополнительной ее увеличению из-за необратимости процесса. Изобразить оба процесса в  $T-s$  – координатах.

**Ответ:**  $\Delta S_{\text{обр}}=0,0706 \text{ кДж}/(\text{кг К}); \Delta S_{\text{необр}}=0,1048 \text{ кДж}/(\text{кг К});$   
 $\Delta s=0,0342 \text{ кДж}/(\text{кг К})$

**4.6.** При политропном сжатии водорода от давления  $p_1=0,1$  МПа и температуры  $t_1=20$  °С до давления  $p_2=0,6$  МПа его удельный объем оказывается равным  $5 \text{ м}^3/\text{кг}$  при необратимом и  $4 \text{ м}^3/\text{кг}$  при обратимом ходе процесса. Считая водород идеальным газом, найти изменение энтропии водорода в обратимом и необратимом процессах. Изобразить их в диаграмме  $T-s$ .

**Ответ:**  $\Delta S_{\text{обр}}=2,501 \text{ кДж}/(\text{кг К}); \Delta S_{\text{необр}}=5,719 \text{ кДж}/(\text{кг К});$   
 $\Delta s=3,218 \text{ кДж}/(\text{кг К})$

**4.7.** Смешиваются две равные по массе порции воды, температура которых  $T_1$  и  $T_2$ . Доказать, что энтропия конечного состояния (после выравнивания температуры) больше энтропии начального состояния.

<b>Дано:</b> $T_1$ $T_2$	<b>Решение:</b> Конечная температура смеси $T = \frac{T_1 + T_2}{2}$ Изменение энтропии $\Delta S_{\text{сист}} = cM \left( \ln \frac{T}{T_1} + \ln \frac{T}{T_2} \right) = cM \ln \frac{T^2}{T_1 T_2} = M \ln \frac{(T_1 + T_2)^2}{4T_1 T_2}$ Величина, стоящая под знаком логарифма, больше единицы, поэтому $\Delta S_{\text{сист}} > 0$
--------------------------------	---

**4.8.** Камень массой 5 кг падает на землю с высоты 20 м. Температура камня и окружающей среды 30 °С. Определить вызванное падением изменение энтропии системы земля-камень.

<p><b>Дано:</b>  <math>m=5</math> кг  <math>h=20</math> м  <math>t_{cp}=-30</math> °С</p>	<p><b>Решение:</b>          Потеря работоспособности в этом процессе равна убыли потенциальной энергии  <math>\Delta L = mgh = 5 \cdot 9,81 \cdot 20 = 981</math> Дж          Кроме того по принципу Гюи-Стодолы  <math>\Delta L = T_{cp} \Delta S</math>          Следовательно  <math>\Delta S = \frac{\Delta L}{T_{cp}} = \frac{981}{303} = 3,24</math> Дж/К</p>
<p><math>\Delta S</math> –?</p>	

**4.9.** Найти потерю работоспособности при передаче теплоты тепловыделяющим элементом атомного реактора воде, которая нагревается от 200 до 300 °С. Температура тепловыделяющего элемента 400 °С. Температура окружающей среды 17 °С. Потери рассчитать на 100 кДж переданной теплоты. Теплопотерями в окружающую среду пренебречь.

**Ответ:**  $\Delta L=12,53$  кДж

**4.10.** В баллоне вместимостью 50 л находится диоксид углерода при температуре 10 °С и давлении 10 МПа. Температура окружающего воздуха 10 °С, давление 1000 гПа. Определить максимальную полезную работу, которую может совершить находящийся в баллоне газ.

**Ответ:**  $\Delta L_{max,n}=1,808$  МДж

**4.11.** Какую максимальную полезную работу может совершить азот массой 1 кг, если в начальном состоянии он имеет давление 100 кПа и температуру 650 К? Состояние окружающей среды характеризуется давлением 100 кПа и температурой 300 К.

<p><b>Дано:</b>  <math>m=1</math> кг  <math>p_1=100</math> кПа  <math>t_1=650</math> К  <math>p_2=100</math> кПа  <math>t_2=300</math> К</p>	<p><b>Решение:</b>          Максимальную работу, которую может совершить азот, можно получить, если его состояние изменится от заданного начального до состояния среды обратным путем.          Понижение температуры азота до температуры среды должно произойти в обратимом адиабатном процессе;          Затем необходимо осуществить сжатие до давления среды обратимым изотермическим процессом.          Определим объемы в точках 1, а, 2:  <math display="block">v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{297 \cdot 650}{10^5} = 1,93 \text{ м}^3</math> <math display="block">v_a = v_1 \left( \frac{T_1}{T_a} \right)^{\frac{1}{k-1}} = 1,93 \left( \frac{650}{300} \right)^{2,5} = 13,34 \text{ м}^3</math> <math display="block">v_2 = \frac{RT_2}{p_2} = \frac{297 \cdot 300}{10^5} = 0,891 \text{ м}^3</math>         Определим давление в точке а:  <math display="block">p_a = \frac{RT_2}{v_a} = \frac{297 \cdot 300}{13,34} = 6,68 \cdot 10^3 \text{ Па}</math>         Определим максимальную полезную работу</p>
<p><math>L</math> –?</p>	

$$l_{\max\Pi} = l_{\text{ад}} - l_{\text{из}} - p_0(v_2 - v_1)$$

$$l_{\max\Pi} = \frac{R}{k-1}(T_1 - T_a) - RT_a \ln \frac{p_2}{p_a} - p_0(v_2 - v_1)$$

$$l_{\max\Pi} = \frac{297}{1,4-1}(650-300) - 297 \cdot 300 \ln \frac{10^5}{6,68 \cdot 10^3} - 10^5(0,891-1,93)$$

$$l_{\max\Pi} = 1,22 \cdot 10^5 \text{ Дж}$$

**4.12.** Определить максимальную работу, которую может совершить воздух массой 1 кг, имеющий давление 2 МПа и температуру 700 К, если параметры внешней среды: давление 0,1 МПа, температура 300 К. Теплоемкость воздуха принять  $c_{pm}=1,006$  кДж/(кг·К).

**Ответ:**  $l_{\max}=213,8$  кДж/кг

**4.13.** Определить максимальную работу, которую может совершить воздух объемом 600 л при давлении 6 МПа и температуре 290К, если параметры внешней среды: давление – 0,1 МПа, температура – 290 К.

**Ответ:**  $L_{\max}=11,2$  МДж

**4.14.** Температура воды горячего источника 110 °С. Среднегодовая температура воздуха в том же районе, где находится источник 10 °С. Найти максимальный термический КПД теплового двигателя, использующего эти две среды в качестве источника и приемника теплоты.

**Ответ:**  $\eta_{tc} = 26,1\%$

**4.15.** В прямом обратимом цикле Карно воздуху массой 1 кг сообщается теплота при 527 °С, равная 24 кДж. Определить термический КПД цикла и количество отведенной теплоты, если температура приемника теплоты равна 7 °С.

**Ответ:**  $\eta_{tc} = 65\%$ ;  $|q_2| = 8,4$  кДж/кг

**4.16.** Холодопроизводительность холодильной машины 200 кВт. Холодильный коэффициент цикла, совершаемого рабочим телом, равен 3. Определить, на сколько градусов нагревается вода, воспринимающая теплоту от рабочего тела, если расход ее составляет 1 м<sup>3</sup>/мин.

**Ответ:**  $:\Delta T=3,8$  К

**4.17.** В обратном обратимом цикле Карно, осуществляемом в схеме теплового насоса, от источника с температурой 31 °С отнимается теплота, равная 125 кДж/кг. Определить температуру среды, которой передается теплота.

**Ответ:**  $: T_1=380$ К

**4.18.** В результате осуществления кругового процесса совершена работа, равная 6020 кгс·м, при этом низкотемпературному источнику отдана теплота, равная 41 кДж. Найти термический КПД цикла.

**Ответ:**  $: \eta_c = 59\%$

**4.19.** При совершении обратного обратимого цикла Карно от источника теплоты с низкой температурой отнимается теплота, равная 238 кДж.

Холодильный коэффициент цикла равен 7. Найти количество теплоты, передаваемой источнику с высокой температурой.

**Ответ:**  $|Q_1| = 272 \text{ кДж}$

**4.20.** В изолированной системе имеется несколько источников теплоты с разными температурами и бесконечно большой теплоемкостью. Самый холодный из них имеет температуру 100 °С, а самый горячий – 1000 °С. К источнику с какой температурой были переданы 200 кДж теплоты от самого горячего источника, если энтропия системы увеличилась из-за этого на 0,176 кДж/К? Чему равна потеря работоспособности системы?

**Ответ:**  $T_2 = 600 \text{ К}; \Delta L = 65,6 \text{ кДж}$

**4.21.** Между источниками теплоты с температурами 700 и 27 °С совершается обратимый цикл Карно, работа которого равняется 100 кДж. Как изменится термический КПД цикла, если при тех же температурах источников и том же количестве подведенной теплоты изотермический процесс расширения рабочего тела будет протекать при разности между температурами рабочего тела и источника в 100 °С? Определить также потерю работоспособности системы в этом случае.

**Дано:**  
 $t_1 = 700 \text{ °С}$   
 $t_2 = 27 \text{ °С}$   
 $L = 100 \text{ кДж}$   
 $\Delta T = 100 \text{ К}$

$\Delta L = ?$

**Решение:**  
 Если совершается обратимый цикл Карно, то температуры рабочего тела и температуры источников равны, тогда термический коэффициент полезного действия цикла определяется по формуле

$$\eta_{\text{тс}} = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{300}{973} = 0,691,$$

а количество подведенной теплоты для этого цикла составит

$$Q_1 = \frac{L_{\text{обр}}}{\eta_{\text{т,обр}}} = \frac{100}{0,691} = 144,7 \text{ кДж}$$

Во втором случае из-за наличия разности между температурами источника и рабочего тела энтропия тела возрастает, и ее изменение можно рассчитать по уравнению

$$\Delta S_{\text{сист}} = \Delta S_{\text{ист}} - \Delta S_{\text{р.т.}} = -\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_1}{T_1'}$$

$$\Delta S_{\text{сист}} = -\frac{144,7}{973} + \frac{144,7}{873} = 0,017 \text{ кДж/К}$$

Потеря работоспособности

$$\Delta L = T_2 \Delta S_{\text{сист}} = 300 \cdot 0,017 = 5,1 \text{ кДж}$$

Работа в необратимом цикле

$$L_{\text{необр}} = L_{\text{обр}} - \Delta L = 100 - 5,1 = 94,9 \text{ кДж}$$

Термический КПД необратимого цикла

$$\eta_{\text{т}} = \frac{L_{\text{необр}}}{Q_1} = \frac{94,9}{144,7} = 0,656 \text{ или}$$

$$\eta_r = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{300}{873_1} = 0,656$$

**4.22.** Согласно предложения французского инженера Клода работу можно получить в результате использования разности между температурами на различных глубинах океана в тропических районах. Каким будет термический КПД обратимого цикла Карно, если в качестве источников использовать воду, температура которой у поверхности 30 °С, а на глубине 8 °С? Какое количество теплой воды необходимо прокачивать через теплообменник установки, в которой осуществляется реальный цикл, чтобы ее мощность достигла 100 кВт? Предположит, что температура воды, которая проходит через установленные в верхних и нижних слоях теплообменники, изменяется на 4 °С. Теплоемкость морской воды 4 кДж/(кг·К). Условно полагать, что термический КПД реального цикла равен КПД цикла Карно.

**Ответ:**  $\eta_c = 7,3\%$ ;  $M = 133$  кг/с

**4.23.** В обратном обратимом цикле Карно от источника с температурой -3 °С отнимается теплота, равная 250 кДж, и передается источнику с температурой 30 °С. Найти работу, затрачиваемую в цикле, и холодильный коэффициент.

**Ответ:**  $\varepsilon_c = 8,18\%$ ;  $|L_c| = 30,6$  кДж

**4.24.** Как изменится температура воздуха в комнате, стены которой защищены идеальной тепловой изоляцией, если в ней в течение 10 ч будет работать домашний холодильник? Дверка холодильника все это время остается открытой. Холодопроизводительность холодильной машины 200 Вт. Холодильный коэффициент цикла 2. Объем комнаты 100 м<sup>3</sup>. Воздух в комнате находился при нормальных физических условиях. Теплоту, идущую на изменение температуры самого домашнего холодильника, не учитывать. Комната герметизирована.

**Ответ:** воздух нагреется на 27,9 К

**4.25.** Холодильник должен выработать 10 кг льда из воды с температурой 0 °С. Температура воздуха, окружающего холодильник, 20 °С. Какое теоретически минимальное количество электроэнергии (в кВт·ч) необходимо затратить для этой цели? Теплота плавления льда 335 кДж/кг.

**Ответ:**  $L = 0,068$  кВт·ч

## Глава 5. Реальные газы

Реальные газы характеризуются способностью изменять свое агрегатное состояние. На рис. 5.1. представлен процесс парообразования и его изображение в  $T-s$  – диаграмме.

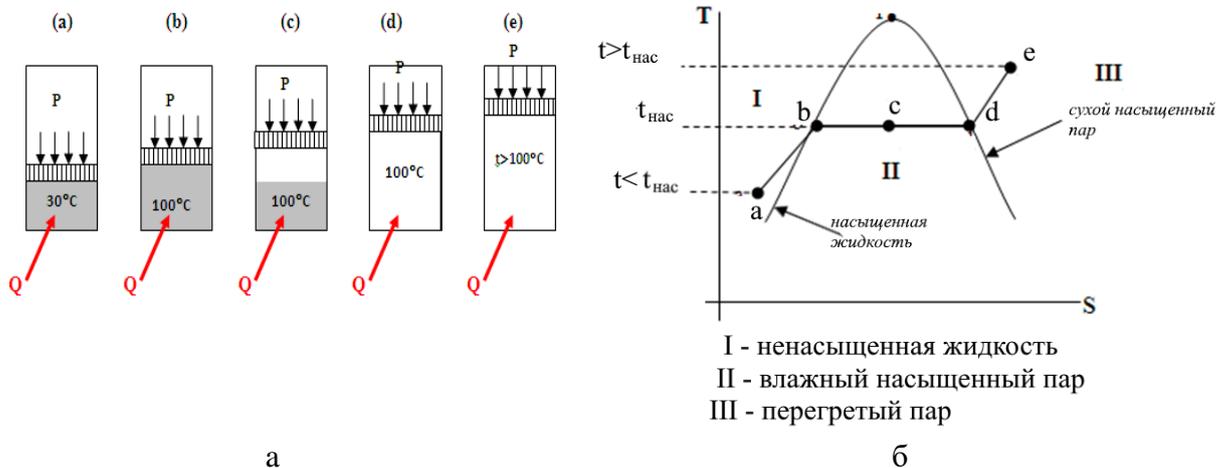


Рис. 5.1. а) Процесс парообразования при  $p=\text{const}$ ; б) процесс парообразования при  $p=\text{const}$

Область I – соответствует состояниям ненасыщенной жидкости. На пограничной кривой  $x=0$  находятся состояния насыщенной жидкости, область II (между пограничными кривыми  $x=0$  и  $x=1$ ) соответствует состояниям влажного насыщенного пара. На пограничной кривой  $x=1$  находится состояние сухого насыщенного пара, а область III (правее пограничной кривой  $x=1$ ) соответствует состояниям перегретого пара.

Насыщенной называют жидкость, имеющую температуру насыщения для данного давления (точка  $b$ ). Состояние насыщенной жидкости можно задать одним любым параметром. Количество теплоты, которое необходимо подвести к жидкости (1 кг), чтобы при постоянном давлении повысить ее температуру от  $0^\circ\text{C}$  до  $t_{\text{н}}$ , называется теплотой насыщенной жидкости и обозначается  $q'$ :

$$q' = \left| c'_p \right|_0^{t_{\text{н}}} t_{\text{н}}, \quad (5.1)$$

где  $c'_p$  – средняя теплоемкость жидкости в процессе.

$$h' = q', \quad u' = q', \quad s' = \left| c'_p \right|_0^{t_{\text{н}}} \ln \left( \frac{T_{\text{н}}}{273} \right). \quad (5.2)$$

При этом полагают, что энтальпия, внутренняя энергия и энтропия жидкости равны нулю при температуре  $0^\circ\text{C}$  и соответствующем давлении насыщения.

Сухим насыщенным паром называют пар, имеющий температуру насыщения и не содержащий ни капли жидкости (точка  $d$ ). Состояние сухого насыщенного пара можно задать одним из любых параметров.

Энтальпию, энтропию и внутреннюю энергию сухого насыщенного пара определяют по формулам

$$h'' = h' + r, \quad s'' = s' + \frac{r}{T_H}, \quad u'' = h'' - pv'' . \quad (5.3)$$

Влажным паром называют смесь сухого пара и насыщенной жидкости (точка  $c$ ). Состояние влажного пара задается двумя параметрами. Очень часто используют такой параметр, как степень сухости, представляющий собой массовую долю сухого насыщенного пара во влажном паре:

$$x = \frac{M_{\text{с.п.}}}{M_{\text{вл.п.}}} . \quad (5.4)$$

Удельный объем, энтальпию и энтропию влажного пара определяют из уравнений

$$v_x = v'(1-x) + v''x, \quad h_x = h' + rx, \quad s_x = s' + \frac{rx}{T_H} . \quad (5.5)$$

Перегретым называют пар, температура которого выше, чем температура насыщения для данного давления (точка  $e$ ). Состояние перегретого пара задают двумя параметрами, чаще всего давлением и температурой. Количество теплоты, которое необходимо подвести к сухому насыщенному пару (1 кг), чтобы при постоянном давлении повысить его температуру от  $t_H$  до температуры перегрева, называют теплотой перегрева и обозначают  $q_H$ :

$$q_H = \left| c_p \right|_{t_H}^{t_H} (t_H - t_H) , \quad (5.6)$$

где  $\left| c_p \right|_{t_H}^{t_H}$  – средняя изобарная теплоемкость пара в процессе перегрева (зависит также и от давления пара).

Энтальпию и энтропию перегретого пара определяют из уравнений

$$h_H = h'' + q_H , \quad (5.7)$$

$$s_H = s'' + \int_{T_H}^{T_H} c_p \frac{dT}{T} . \quad (5.8)$$

## Задачи

**5.1.** Манометр парового котла показывает давление 0,746 МПа. Показания барометра 1040 гПа. Считая водяной пар сухим насыщенным, определить его температуру, удельный объем, энтальпию и энтропию.

<p><b>Дано:</b>  <math>p_{\text{изб}}=0,746</math> МПа  <math>p_{\text{бар}}=B=1040</math> гПа  <math>x=1</math></p>	<p><b>Решение:</b>                  Абсолютное давление  <math>p_{\text{абс}}= p_{\text{изб}}+ p_{\text{бар}} =0,746+0,104=0,85</math> МПа</p>
<p><math>t, v, h, s -?</math></p>	<p>Из таблиц термодинамических свойств воды и водяного пара в состоянии насыщения находим:  <math>t_{\text{н}}=172,95</math> °С  <math>v''=0,227</math> м<sup>3</sup>/кг  <math>h''=2770,8</math> кДж/кг  <math>s''=6,641</math> кДж/(кг К)</p>

**5.2.** Найти состояние и все параметры водяного пара, если его давление 300 кПа, а удельный объем 0,4 м<sup>3</sup>/кг.

<p><b>Дано:</b>  <math>p=300</math> кПа  <math>v=0,4</math> м<sup>3</sup>/кг</p>	<p><b>Решение:</b>                  Из таблиц термодинамических свойств воды и водяного пара в состоянии насыщения находим, что давлению 0,3 МПа соответствует объем сухого насыщенного пара <math>v''=0,606</math> м<sup>3</sup>/кг.</p>
<p><math>t, v, h, s -?</math></p>	<p>Так как удельный объем пара в заданном состоянии меньше <math>v''</math>, то пар является влажным насыщенным.                  Температура насыщения:  <math>t_{\text{н}}=133,54</math> °С                  Параметры пара при температуре насыщения:  <math>v'=0,00107</math> м<sup>3</sup>/кг  <math>h'=561,4</math> кДж/кг  <math>r=2164,1</math> кДж/кг  <math>s'=1,672</math> кДж/(кг К)</p> <p style="text-align: center;"> <math display="block">x = \frac{v - v''}{v'' - v'} = \frac{0,4 - 0,00107}{0,606 - 0,00107} = 0,66</math> </p> <p> <math>h = h' + r \cdot x = 561,4 + 2164,1 \cdot 0,66 = 1991</math> кДж/кг  <math>s = s' + \frac{rx}{T_{\text{н}}} = 1,672 + \frac{2164,1 \cdot 0,66}{406,54} = 5,192</math> кДж/(кг К)</p>

**5.3.** Определить состояние и все параметры пара R22, температура которого - 11 °С, а энтальпия 550 кДж/кг.

**Ответ:** влажный насыщенный пар;  $p_{\text{н}}=0,34$  МПа;  
 $x=0,296$ ;  $v=0,02$  м<sup>3</sup>/кг;  $s=1,193$  кДж/(кг К)

**5.4.** Найти состояние и все параметры пара аммиака, если его давление 355 кПа, а удельный объем 0,386 м<sup>3</sup>/кг.

**Ответ:** перегретый пар;  $t=20$  °С;  $h=1817,7$  кДж/кг;  
 $s=6,905$  кДж/(кг К)

5.5. Определить состояние и параметры хладагента R134a, если  $p=0,4$  МПа и  $t=20$  °С.

**Ответ:** перегретый пар  $\rho=18,45$  кг/м<sup>3</sup>;  $h=414,2$  кДж/кг;  
 $s=1,759$  кДж/(кг К)

5.6. Определить состояние и параметры хладагента R125, если  $p=0,23$  МПа и  $v=0,04$  м<sup>3</sup>/кг.

**Ответ:** влажный насыщенный пар;  $t_n=-30$  °С;  $x=0,587$ ;  
 $h=554,4$  кДж/кг;  $s=1,233$  кДж/(кг К)

5.7. Определить состояние и параметры хладагента R125, если при  $p=1,205$  МПа ,  $\rho=77,76$  кг/м<sup>3</sup>.

**Ответ:** сухой насыщенный пар;  $t_n=20$  °С;  $x=1$ ;  
 $h''=641,8$  кДж/кг;  $s''=1,485$  кДж/(кг К)

5.8. Рассчитать внутреннюю энергию сухого насыщенного водяного пара при температуре 200 °С.

**Ответ:**  $u''=2593,4$  кДж/кг

5.9. Определить массу влажного насыщенного пара R12, его внутреннюю энергию, энтальпию и энтропию при давлении 124 кПа. Степень сухости пара 0,8;  $V=10$  м<sup>3</sup>.

**Ответ:**  $M=95,2$  кг;  $U=47,06$  МДж;  $H=48,3$  МДж;  
 $S=4,23$  МДж/ К

5.10. Энтальпия водяного пара при давлении 1,5 МПа равна 2000 кДж/кг. Определить состояние пара.

**Ответ:** влажный насыщенный пар;  $x=0,592$

5.11. Какое количество теплоты необходимо подвести к влажному насыщенному пару аммиака объемом 5 м<sup>3</sup> при давлении 0,43 МПа и степени сухости 0,25, чтобы превратить его в перегретый пар с тем же давлением и температурой 50 °С?

**Ответ:**  $Q=73,24$  МДж

5.12. Найти теплоту перегрева пара R12, давление которого 0,1 МПа, а температура 0 °С. При решении использовать значения энтальпии пара и данные о теплоемкости пара (для второго, приближенного решения).

<b>Дано:</b> $p=0,1$ МПа $t=0$ °С	<b>Решение:</b> Давлению 0,1 МПа для R12 соответствует температура насыщения $t_n=-30$ °С, а значит, при указанных параметрах пар ХА перегрет на 30 К. Определим теплоту перегрева:
$q=?$	а) $h=555,86$ кДж/кг; $h''=538,3$ кДж/кг; $q_n = h - h'' = 555,86 - 538,3 = 17,56$ кДж/кг б) Этот способ расчета позволяет приближенно определить значение теплоты перегрева, так как вместо средней теплоемкости перегретого пара в расчете используем

изобарную теплоемкость сухого насыщенного пара при температуре насыщения

$$c_p = 0,536 \text{ кДж/(кг К)}$$

$$q_{\text{п}} = c_p (t - t_{\text{н}}) = 0,536(0 - (-30)) = 16,1 \text{ кДж/кг}$$

**5.13.** Какое количество теплоты надо отвести в изобарном процессе от влажного насыщенного водяного пара массой 1 кг, имеющего параметры  $p=3$  МПа и  $x=0,6$ , чтобы превратить его в воду с температурой  $150$  °С?

**Ответ:**  $q=1452$  кДж/кг

**5.14.** Объем испарителя холодильной машины  $2 \text{ м}^3$ . В нем находится  $2000$  кг жидкого и парообразного R13 при температуре насыщения  $-80$  °С. Найти массу жидкого хладона и его сухого насыщенного пара.

**Дано:**

$$V=2 \text{ м}^3$$

$$M=2000 \text{ кг}$$

$$t_{\text{н}}=-80 \text{ °С}$$

$$M_{\text{ж}}; M_{\text{п}} - ?$$

**Решение:**

Обозначим массу жидкости  $M_{\text{ж}}$  и массу пара  $M_{\text{п}}$ ;

$$\text{Объем занимаемый паром } V_{\text{п}} = M_{\text{п}} v'' ,$$

$$\text{объем, занимаемый жидкостью } V_{\text{ж}} = M_{\text{ж}} v' .$$

$$\text{Общая масса составляет } M = M_{\text{ж}} + M_{\text{п}}$$

$$\text{Общий объем составляет } V = M_{\text{ж}} v' + M_{\text{п}} v'' ,$$

Кроме того, можно записать

$$V = (M - M_{\text{п}}) v' + M_{\text{п}} v'' = M v' + M_{\text{п}} (v'' - v') , \text{ откуда}$$

$$M_{\text{п}} = \frac{V - M v'}{v'' - v'} = \frac{2 - 2000 \cdot 0,6589 \cdot 10^{-3}}{0,1339 - 0,6589 \cdot 10^{-3}} = 5,1 \text{ кг},$$

$$\text{тогда } M_{\text{ж}} = M - M_{\text{п}} = 2000 - 5,1 = 1994,9 \text{ кг}$$

**5.15.** В баллоне вместимостью  $100$  л находится аммиак массой  $5$  кг в жидком и парообразном состояниях. Какое количество теплоты необходимо подвести к аммиаку, чтобы давление в баллоне повысилось от  $0,4$  до  $1,2$  МПа?

**Ответ:**  $Q_{1-2}=1,32$  МДж

**5.16.** В баллоне вместимостью  $50$  л находится хладагент R22 массой  $20$  кг в жидком и парообразном состояниях. В течение длительного времени баллон находится в помещении, температура воздуха в котором  $18$  °С. Определить массы жидкого хладона и его сухого насыщенного пара.

**Ответ:** масса сухого пара  $1,26$  кг; масса жидкости  $18,74$  кг

**5.17.** В паровом котле находится  $200$  кг кипящей воды и  $50$  кг сухого насыщенного пара при давлении  $1,0$  МПа. Какое количество теплоты необходимо подвести, чтобы пар в котле стал сухим насыщенным? Какое давление будет при этом в котле?

**Дано:**

$$p=1,0 \text{ МПа}$$

$$M_{\text{ж}}=200 \text{ кг}$$

$$M_{\text{п}}=50 \text{ кг}$$

$$x_2=1$$

**Решение:**

Начальная степень сухости влажного пара в котле составляет:

$$x_1 = \frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{п}} + M_{\text{ж}}} = \frac{50}{200 + 50} = 0,2$$

$Q; p_n - ?$

Его удельный объем равен

$$v_1 = v'(1 - x_1) + v''x_1 = 0,0011 \cdot 0,8 + 0,1943 \cdot 0,2 = 0,0397 \text{ м}^3/\text{кг}$$

энтальпия

$$h_1 = h' + rx = 762,6 + 2014,4 \cdot 0,2 = 1165 \text{ кДж/кг}$$

внутренняя энергия

$$u_1 = h_1 - p_1 v' = 1165 - 0,0397 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6 = 1125 \text{ кДж/кг}$$

Удельный объем сухого пара будет таким же, как и влажного насыщенного, так как процесс подвода теплоты изохорный, а масса пара не изменяется. Подберем в таблицах термодинамических свойств воды и водяного пара состояние сухого пара, удельный объем которого  $0,0397 \text{ м}^3/\text{кг}$ . С некоторым приближением примем за искомое состояние – сухой насыщенный пар с температурой  $264 \text{ }^\circ\text{C}$ . Его давление  $p = 5,007 \text{ МПа}$

внутренняя энергия

$$u'' = h'' - p_2 v_2'' = 2792,8 - 5,007 \cdot 10^6 \cdot 0,0397 \cdot 10^{-3} = 2594 \text{ кДж/кг}$$

Теплота процесса будет равна

$$Q_{1-2} = M(u'' - u_1) = 250(2594 - 1125) = 367 \text{ МДж}$$

**5.18.** В ресивере холодильной машины находится аммиак массой  $500 \text{ кг}$  при температуре помещения  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Объем ресивера  $4 \text{ м}^3$ . Какое количество аммиака надо удалить из ресивера, чтобы давление пара аммиака в нем стало равным  $0,73 \text{ МПа}$  при той же температуре?

**Ответ:**  $\Delta M = 478,2 \text{ кг}$

**5.19.** Пользуясь  $\lg p-h$  – диаграммой, определить состояние и остальные параметры аммиака, если известны давление  $p = 0,3 \text{ МПа}$  и удельный объем  $v = 0,05 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

**Ответ:** влажный насыщенный пар;  $t_n = -9 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $x = 0,12$ ;  
 $h = 613,8 \text{ кДж/кг}$ ;  $s = 4,17 \text{ кДж/(кг К)}$

**5.20.** С помощью  $\lg p-h$  – диаграммы найти состояние и остальные параметры аммиака, если известны давление  $p = 0,07 \text{ МПа}$  и температура  $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Ответ:** перегретый пар;  $v = 1,62 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  
 $h = 1730 \text{ кДж/кг}$ ;  $s = 7,34 \text{ кДж/(кг К)}$

**5.21.** Используя  $\lg p-h$  – диаграмму, определить теплоту парообразования аммиака при температуре  $-26 \text{ }^\circ\text{C}$  и найденное значение сравнить с табличным.

**Ответ:**  $r = 1350 \text{ кДж/кг}$ ; табличное значение  $r = 1347,4 \text{ кДж/кг}$

**5.22.** Пользуясь диаграммой, найти, как изменится степень сухости влажного насыщенного пара аммиака, если к нему в изобарном процессе подвести теплоту  $920 \text{ кДж/кг}$ . В начальном состоянии удельный объем пара  $0,155 \text{ м}^3/\text{кг}$  и энтропия  $3,0 \text{ кДж/(кг К)}$ .

**Ответ:** степень сухости в начальном состоянии  $x_1 = 0,26$ ;  
в конечном  $x_2 = 0,95$

**5.23.** Сухой насыщенный пар аммиака адиабатно сжимается в компрессоре от начального давления  $p_1 = 0,03 \text{ МПа}$  до конечного  $p_2 = 0,35 \text{ МПа}$ . С помощью

диаграммы определить параметры пара в конечном состоянии и удельную работу компрессора.

**Ответ:**  $|l_{ад}| = 360 \text{ кДж/кг}$

**5.24.** В баллоне вместимостью 50 л находится аммиак массой 5 кг при температуре 16 °С. Используя диаграмму, найти: 1) массу жидкого аммиака в баллоне при указанной температуре; 2) как изменится давление аммиака в баллоне, если температура повысится до 45 °С. Найденное значение давления сравнить с табличным.

<p><b>Дано:</b>  <math>V=50 \text{ л}</math>  <math>M=5 \text{ кг}</math>  <math>t_1=16 \text{ °С}</math>  <math>t_2=45 \text{ °С}</math></p>	<p><b>Решение:</b>  <i>Определим удельный объем аммиака в баллоне</i>  <math display="block">v = \frac{V}{M} = \frac{0,05}{5} = 0,01 \text{ м}^3/\text{кг}</math> <i>Зная удельный объем и температуру, находим на диаграмме состояние аммиака. Это влажный насыщенный пар с давлением <math>p=0,75 \text{ МПа}</math> и степенью сухости 0,05.</i>  <i>Масса сухого пара составляет</i>  <math display="block">M'' = M \cdot x = 5 \cdot 0,05 = 0,25 \text{ кг}</math> <i>Масса жидкости</i>  <math display="block">M_{ж} = M - M'' = 5 - 0,25 = 4,75 \text{ кг}</math> <i>Температура насыщения соответствует давлению 1,8 МПа (табличное значение 1,78 МПа)</i></p>
<p><math>M_{ж}; p_2 - ?</math></p>	

**5.25.** До какого давления нужно адиабатно расширить перегретый пар хладагента R125 от исходного состояния с параметрами  $p_1=3,172 \text{ МПа}$  и  $t_1=70 \text{ °С}$ , чтобы он стал сухим насыщенным?

**Ответ:**  $p_2=0,056 \text{ МПа}$

**5.26.** Какой должна быть температура насыщенной жидкости хладагента R125, чтобы при адиабатном дросселировании ее получить влажный пар с температурой 0 °С и степенью сухости 0,5?

**Ответ:**  $t_{н}=46,9 \text{ °С}$

**5.27.** Пользуясь диаграммой, определить, какое количество теплоты надо отвести от перегретого пара аммиака массой 1 кг при давлении 1,2 МПа и температуре 80 °С, чтобы превратить его в жидкость при том же давлении и температуре 18 °С.

**Ответ:**  $|q| = 1350 \text{ кДж/кг}$

**5.28.** В дроссельный вентиль поступает насыщенная жидкость аммиака при температуре 35 °С. С помощью диаграммы найти все параметры влажного насыщенного пара, образующегося после дросселирования, если его температура -30 °С. Процесс дросселирования протекает без подвода и отвода теплоты.

**Ответ:**  $p=0,12 \text{ МПа}; x=0,225; v=0,215 \text{ м}^3/\text{кг}; h=666 \text{ кДж/кг}; s=2,716 \text{ кДж/(кг К)}$

**5.29.** Используя диаграмму, определить состояние и остальные параметры хладагента R22, если известно, что его удельный объем равен 0,12 м<sup>3</sup>/кг, а температура -27 °С.

**Ответ:** сухой насыщенный пар;  $p=0,185$  МПа;  
 $h''=62$  кДж/кг;  $s''=1,795$  кДж/(кг К)

**5.30.** С помощью диаграммы найти теплоту парообразования хладагента R22 при температуре  $0$  °С. Найденное значение сравнить с табличным.

**Ответ:**  $r=204$  кДж/кг

**5.31.** Хладагент R22 сжимается изотермически при температуре  $-20$  °С от начального объема  $0,3$  м<sup>3</sup>/кг до конечного  $0,01$  м<sup>3</sup>/кг.

**Ответ:** начальное состояние – перегретый пар,  
конечное – влажный насыщенный.  $|q|=228$  кДж/кг.

**5.32.** В баллоне вместимостью  $50$  л находится хладагент R22 массой  $2,5$  кг при температуре  $-10$  °С. Пользуясь диаграммой, найти массу жидкого хладагента после того, как баллон перенесут в помещение, и температура хладагента повысится до  $20$  °С.

**Ответ:** масса жидкого ХА  $0,6$  кг.

**5.33.** Используя диаграмму, определить работу, которую необходимо затратить на привод компрессора, чтобы путем адиабатного сжатия превратить влажный насыщенный пар хладагента R22 массой  $1$  кг, имеющий степень сухости  $0,8$  и энтропию  $1,7$  кДж/(кг·К), в перегретый пар с температурой  $102$  °С.

**Ответ:**  $|l_{ад}|=127$  кДж/кг.

**5.34.** Ненасыщенная жидкость хладагента R22 находится при давлении  $0,3$  МПа, ее энтальпия  $460$  кДж/кг. Пользуясь диаграммой, определить, как изменится температура хладона, если к нему в изобарном процессе подвести теплоту  $290$  кДж/кг.

**Ответ:** температура ХА повысится от  $-35$  °С до  $+60$  °С.

**5.35.** С помощью диаграммы найти, какой объем занимает хладагент R22 массой  $50$  кг с температурой  $-20$  °С и энтальпией  $620$  кДж/кг.

**Ответ:**  $V=3$  м<sup>3</sup>.

**5.36.** Определить изменение удельных энтальпии и энтропии пара хладона R13 в процессе его перегрева при постоянном давлении до  $-80$  °С. В начальном состоянии пар хладона является сухим насыщенным с удельным объемом  $0,4056$  м<sup>3</sup>/кг. Среднее значение изобарной теплоемкости пара хладагента в этом процессе принять  $0,4$  кДж/(кг·К).

**Ответ:**  $\Delta h=8$  кДж/кг;  $\Delta s=0,0438$  кДж/(кг К).

**5.37.** Пользуясь  $h-s$  – диаграммой, определить состояние и остальные параметры водяного пара, если его давление  $1,0$  МПа и удельный объем  $0,18$  м<sup>3</sup>/кг.

**Ответ:** влажный насыщенный пар;  $t_{н}=180$  °С;  
 $x=0,92$ ;  $h=2616$  кДж/кг;  $s=6,23$  кДж/(кг К).

**5.38.** С помощью  $h-s$  – диаграммы найти конечное состояние и все параметры пара, образовавшегося в результате адиабатного сжатия в компрессоре влажного насыщенного водяного пара. Параметры влажного насыщенного пара  $p_1=0,005$  МПа и  $x_1=0,855$ . Работа, затраченная при этом в компрессоре, равна  $650$  кДж/кг.

**Ответ:** в конечном состоянии перегретый пар,

$$p_2=0,34 \text{ МПа}; t_2=200 \text{ }^\circ\text{C}; v_2=0,63 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$h_2=2860 \text{ кДж/кг}; s_2=7,38 \text{ кДж/(кг К)}.$$

**5.39.** Используя диаграмму, определить теплоту, которая подводится к водяному пару в изотермическом процессе. В начальном состоянии давление пара 0,1 МПа и удельный объем 1,6 м<sup>3</sup>/кг, а в конечном – удельный объем 50 м<sup>3</sup>/кг.

**Ответ:**  $q_{1-2}=720 \text{ кДж/кг}.$

**5.40.** С помощью диаграммы найти, как изменится степень сухости водяного пара, если к нему в изобарном процессе подвести теплоту 220 кДж/кг. В начальном состоянии давление пар 0,003 МПа и степень сухости 0,81.

**Ответ:**  $x_2=0,9.$

**5.41.** Пользуясь диаграммой, определить теплоту перегрева водяного пара при давлении 4 МПа и температуре 330 °С.

**Ответ:**  $q_{\text{п}}=240 \text{ кДж/кг}.$

**5.42.** Сухой насыщенный водяной пар с начальным давлением 0,5 МПа адиабатически расширяется до давления 9 кПа. Какой процент пара при этом конденсируется? Задачу решить, пользуясь диаграммой. Результат проверить расчетом, используя данные таблиц.

<p><b>Дано:</b>  <math>p_1=0,5 \text{ МПа}</math>  <math>p_2=9 \text{ кПа}</math>  <math>x_1=1</math>  <math>s_2= s_1</math></p>	<p><b>Решение:</b>  1) На диаграмме находим степень сухости образовавшегося влажного насыщенного пара  <math>x_2=0,82</math>  значит, сконденсировалось 18% пара.  2) аналитическое решение</p>
<p><math>(1-x) - ?</math></p>	$\begin{cases} s_1 = s'_1 + \frac{r_1}{T_1} \\ s_2 = s'_2 + \frac{r_2 x_2}{T_2} \end{cases} \Rightarrow x = \frac{\left( s'_1 - s'_2 + \frac{r_1}{T_1} \right) T_2}{r_2}$ $x = \frac{\left( 1,86 - 0,62 + \frac{2108}{425} \right) 317}{2397} = 0,82$ <p><math>1-x=0,18</math></p>

**5.43.** В закрытом сосуде объемом 0,01 м<sup>3</sup> находится аммиак массой 0,23 кг. Найти количество теплоты, необходимое для нагревания аммиака от -20 до 90 °С. Изменением объема сосуда при нагревании пренебречь. При какой температуре в процессе нагревания испарится последняя капля жидкого аммиака?

**Ответ:**  $Q=283,1 \text{ кДж}; t=64,5 \text{ }^\circ\text{C}.$

**5.44.** В турбине адиабатно расширяется перегретый водяной пар (10 кг/с). Начальное состояние пара характеризуется давлением 5 МПа и температурой 510 °С, конечное давление 5 кПа. Определить теоретическую мощность турбины, используя данные  $h-s$  – диаграммы.

**Ответ:**  $N=13,2 \text{ МВт}.$

**5.45.** В цилиндре с подвижным поршнем находится влажный насыщенный водяной пар при температуре 60 °С. Степень сухости пара 0,83. Пар подвергается сжатию, в конце которого становится сухим насыщенным при температуре 170 °С. Определить, с подводом или отводом теплоты протекает этот процесс.

**Ответ:**  $s_2 < s_1$ ; значит, процесс протекает с отводом теплоты.

**5.46.** Найти изменение энтропии в изобарном процессе превращения льда (1 кг) в сухой насыщенный пар при 100 °С. Начальная температура льда -40 °С. Принять удельную теплоемкость льда 2,1 кДж/(кг·К) и теплоту плавления льда 335 кДж/кг.

**Ответ:**  $\Delta s = 8,92$  кДж/(кг К).

**5.47.** Рассчитать изотермический процесс (определить теплоту, работу и изменение внутренней энергии) превращения влажного насыщенного водяного пара (1 кг) со степенью сухости 0,5 в перегретый пар с давлением 0,5 МПа. Температура пара в процессе 180 °С.

<p><b>Дано:</b>  <math>p_2=0,5</math> МПа  <math>t_1=180</math> °С  <math>x_1=0,5</math>  <math>t_2= t_1</math></p>	<p><b>Решение:</b>            Рассчитываем параметры водяного пара в начальном состоянии с помощью таблиц:  <math>t_1=180</math> °С  <math>p_1=1</math> МПа  <math>x_1=0,5</math>  <math>v_1 = v'_1(1 - x_1) + v''_1x_1 = 0,194 \cdot 0,5 + 0,0011 \cdot 0,5 = 0,097</math> м<sup>3</sup>/кг  <math>h_1 = h'_1 + r_1x_1 = 763 + 2014 \cdot 0,5 = 1770</math> кДж/кг  <math>s_1 = s'_1 + \frac{r_1x_1}{T_1} = 2,139 + \frac{2014 \cdot 0,5}{453} = 4,362</math> кДж/(кг К)            Параметры конечного состояния определяем по таблицам перегретого пара:  <math>p_2=0,5</math> МПа  <math>t_2=180</math> °С  <math>v_2=0,405</math> м<sup>3</sup>/кг  <math>h_2=2812</math> кДж/кг  <math>s_2=6,967</math> кДж/(кг К)            Определяем теплоту процесса  <math>q_{1-2} = T(s_2 - s_1) = 453(6,967 - 4,362) = 1180</math> кДж/кг            Рассчитываем изменение внутренней энергии  <math>\Delta u_{1-2} = h_2 - h_1 - (p_2v_2 - p_1v_1) =</math>  <math>= 2812 - 1770 - (5 \cdot 10^2 \cdot 0,405 - 0,097 \cdot 10^3) = 936,5</math> кДж/кг            Работа процесса  <math>l_{1-2} = q_{1-2} - \Delta u_{1-2} = 1180 - 936,5 = 243,5</math> кДж/кг</p>
<p><math>q, l, \Delta u - ?</math></p>	

**5.48.** Рассчитать изотермический процесс пара аммиака, происходящий при температуре -10 °С. Удельный объем в начальном и конечном состояниях соответственно 0,3 и 0,619 м<sup>3</sup>/кг.

**Ответ:**  $p_1=0,291$  МПа;  $x_1=0,72$ ;  $h_1=1387$  кДж/кг;  
 $s_1=5,38$  кДж/(кг К);  $p_2=0,2$  МПа;  $h_2=1760$  кДж/кг;  
 $s_2=6,97$  кДж/(кг К);  $q_{1-2}=418$  кДж/кг;

$$\Delta u_{1-2}=336 \text{ кДж/кг}; l_{1-2}=82 \text{ кДж/кг}$$

**5.49.** Хладагент R134a массой 1 кг адиабатно сжимается от состояния с давлением 0,1 МПа и температурой -10 °С до давления 0,7 МПа. Определить параметры начального и конечного состояний, а также теплоту, работу и изменение внутренней энергии процесса.

**Ответ:**  $v_1=0,207 \text{ м}^3/\text{кг}; h_1=395,8 \text{ кДж/кг};$   
 $s_2= s_1=1,799 \text{ кДж}/(\text{кг К}); t_2=52,5 \text{ }^\circ\text{C}; v_2=0,0337 \text{ м}^3/\text{кг};$   
 $h_2=439,4 \text{ кДж/кг}; q=0 \text{ кДж/кг};$   
 $\Delta u = -l = 40,74 \text{ кДж/кг}$

**5.50.** В изобарном процессе от пара хладагента R125 массой 1 кг при давлении 1,205 МПа и температуре 70 °С отводится теплота 100 кДж. Определить параметры конечного состояния, а также работу и изменение внутренней энергии в процессе.

**Ответ:**  $t_2=20 \text{ }^\circ\text{C}; h_2=590,3 \text{ кДж/кг}; x_2=0,556;$   
 $v_2=0,00752 \text{ м}^3/\text{кг}; s_2=1,31 \text{ кДж}/(\text{кг К});$   
 $l = -11,9 \text{ кДж/кг}; \Delta u = -88,1 \text{ кДж/кг}$

**5.51.** Рассчитать процесс, в котором при постоянном давлении 0,5 МПа энтропия пара хладагента R22 изменяется от 1,3 до 2,0 кДж/(кг·К).

**Ответ:**  $q=202 \text{ кДж/кг}; \Delta u = 176 \text{ кДж/кг}; l= 26 \text{ кДж/кг}$

**5.52.** Рассчитать изохорный процесс пара хладагента R22, в котором при постоянном объеме 0,2 м<sup>3</sup>/кг температура пара повышается от -50 до 71 °С.

**Ответ:**  $l= 0 \text{ кДж/кг}; q = \Delta u = 148 \text{ кДж/кг}$

**5.53.** В изохорном процессе значение энтропии пара R12 увеличивается от 4,5525 до 4,6776 кДж/(кг·К). Пользуясь таблицами, определить, каковы конечное состояние пара хладона и количество теплоты, подведенной к нему. В начальном состоянии пар сухой насыщенный.

**Ответ:** *конечное состояние*  $l= 0 \text{ кДж/кг};$   
 $q = \Delta u = 148 \text{ кДж/кг}.$

**5.54.** К аммиаку массой 1 кг при  $t_1=-30 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $v_1=0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$  подводится теплота при  $v_1=v_2$ , давление при этом увеличивается до  $p_2=0,73 \text{ МПа}$ , а затем аммиак изотермически расширяется до первоначального давления. Определить параметры всех названных состояний, а также теплоту, работу и изменение внутренней энергии каждого из процессов. Изобразить процессы в  $p$ - $v$ ,  $T$ - $s$  и  $\lg p$ - $h$  – координатах.

**Ответ:**

	$t$ , °С	$p$ , МПа	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$x$	Про- цесс	$q$ , кДж/кг	$l$ , кДж/кг	$\Delta u$ , кДж/кг
1	-30	0,119	0,2	644,5	2,6261	0,206				
2	45	0,73	0,2	1856,4	6,699	-	1-2	1089,7	0	1089,7
3	45	0,119	1,288	1888,8	7,658	-	2-3	305,11	280,06	25,05

**5.55.** К хладагенту R22 массой 1 кг при температуре -30 °С и степени сухости 0,1 при постоянном давлении подводится теплота, и температура увеличивается до

30 °С, а затем R22 адиабатно расширяется до давления 0,0375 МПа. Изобразить процессы в  $p-v$ ,  $T-s$ ,  $lgr-h$  координатах. Определить параметры всех названных состояний, а также теплоту, работу и изменение внутренней энергии каждого из процессов.

<p><b>Дано:</b>  <math>t_1 = -30</math> °С  <math>x_1 = 0,1</math>  <math>p_2 = p_1</math>  <math>t_2 = 30</math> °С  <math>s_3 = s_2</math>  <math>p_3 = 0,0375</math> МПа</p>	<p><b>Решение:</b>  <math>p_2 = p_1 = 0,164</math> МПа  <math>v_1 = 0,0142</math> м<sup>3</sup>/кг  <math>h_1 = 488,36</math> кДж/кг  <math>s_1 = 0,9612</math> кДж/(кг К)</p> <p><math>p_2 = p_1</math>  <math>t_2 = 30</math> °С  <math>v_2 = 0,174</math> м<sup>3</sup>/кг  <math>h_2 = 731,61</math> кДж/кг  <math>s_2 = 1,9444</math> кДж/(кг К)</p> <p><math>s_3 = s_2</math>  <math>t_3 = -33,2</math> °С  <math>v_3 = 0,608</math> м<sup>3</sup>/кг  <math>h_3 = 693,83</math> кДж/кг</p> <p><math>q_{1-2} = 243,25</math> кДж/кг  <math>l_{1-2} = 26,21</math> кДж/кг  <math>\Delta u_{1-2} = 217,04</math> кДж/кг</p> <p><math>q_{2-3} = 0</math> кДж/кг  <math>l_{2-3} = -\Delta u_{2-3} = -32,08</math> кДж/кг</p>
<p><math>q, l, \Delta u</math> –?</p>	

**5.56.** К аммиаку массой 1 кг при  $t_1 = -30$  °С и  $v_1 = 0,2$  м<sup>3</sup>/кг подводится теплота при  $v_1 = v_2$ , давление при этом увеличивается до  $p_2 = 0,73$  МПа, а затем аммиак изотермически расширяется до первоначального давления. Определить параметры всех названных состояний, а также теплоту, работу и изменение внутренней энергии каждого из процессов. Изобразить процессы в  $p-v$ ,  $T-s$  и  $lgr-h$  – координатах.

**Ответ:**

	$t$ , °С	$p$ , МПа	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$x$	Процесс	$q$ , кДж/кг	$l$ , кДж/кг	$\Delta u$ , кДж/кг
1	-30	0,119	0,2	644,5	2,6261	0,206				
2	45	0,73	0,2	1856,4	6,699	-	1-2	1089,7	0	1089,7
3	45	0,119	1,288	1888,8	7,658	-	2-3	305,11	280,06	25,05

**5.57.** Хладагент R125 массой 1 кг при давлении 1,569 МПа и температуре 80 °С адиабатно расширяется до давления 0,23 МПа, а затем изотермически сжимается до состояния насыщенной жидкости. Определить параметры всех

названных состояний, а также теплоту, работу и изменение внутренней энергии каждого из процессов. Изобразить процессы в  $p-v$ ,  $T-s$  и  $\lg p-h$  – координатах.

**Ответ:**

	$t$ , °C	$p$ , МПа	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$x$	Про- цесс	$q$ , кДж/кг	$l$ , кДж/кг	$\Delta u$ , кДж/кг
1	80	1,569	0,0134	696,6	1,6405	0				
2	21	0,23	0,085	657,16	1,6405	-	1-2	0	37,97	-37,97
3	21	1,24	0,000824	527,1	1,094	0	2-3	-160,75	-49,22	-111,53

**5.58.** Вычислить значение изобарной теплоемкости перегретого пара R22 при температурах 80-100 °C и давлении 0,1 МПа, используя данные об энтальпии и энтропии пара при этих температурах.,

**Ответ:**  $c_{pm} = 0,728$  кДж/кг.

**5.59.** Найти приближенное значение изобарной теплоемкости сухого насыщенного пара аммиака при 0 °C, используя для этой цели данные об энтальпии и энтропии пара на кривой насыщения и вблизи нее. Полученные данные о теплоемкости сравнить с литературными и определить погрешность.

<b>Дано:</b> $t=0$ °C $x_1=1$	<b>Решение:</b> Энтальпия сухого насыщенного пара аммиака при 0 °C $h''=1761,5$ кДж/кг Вторую точку, необходимую для расчетов, берем в области перегретого пара при $t_2=5$ °C
$c_p$ –?	$h_2=1774,5$ кДж/кг Теплоемкость рассчитываем по уравнению $c_p = \frac{\Delta h}{\Delta T} = \frac{1774,5 - 1761,5}{5} = 2,6$ кДж/(кг К) В таблицах термодинамических свойств газов и жидкостей $c_p=2,624$ кДж/(кг К) Погрешность составляет 0,91%

**5.60.** Рассчитать приближенное значение теплоты парообразования R12 при температуре -10 °C, если значение давления его насыщенного пара следующие: при 9 °C  $p_n=0,2275$  МПа, при -10 °C  $p_n=0,2196$  МПа. Удельные объемы при -10 °C насыщенной жидкости и сухого насыщенного пара соответственно  $7 \cdot 10^{-4}$  и  $7,69 \cdot 10^{-2}$  м<sup>3</sup>/кг. Полученный результат сравнить с табличными данными и определить погрешность.

<b>Дано:</b> $t_1=9$ °C $p_1=0,2275$ МПа $t_2=10$ °C $p_2=0,22196$ МПа $v'=7 \cdot 10^{-4}$ м <sup>3</sup> /кг $v''=7,69 \cdot 10^{-2}$ м <sup>3</sup> /кг	<b>Решение:</b> Из уравнения Клапейрона-Клазиуса $r = \frac{T(v'' - v')}{\left(\frac{dp}{dT}\right)_n}$ Приближенное значение производной составляет $\frac{dp}{dT} = \frac{227500 - 219600}{1} = 7900$ Н/(м <sup>2</sup> К) Приближенное значение теплоты парообразования равно $r = 263 \cdot (0,0769 - 0,007) \cdot 7900 = 158,41$ кДж/кг Табличное значение
$r$ –?	

$$r = 156,92 \text{ кДж/кг}$$

Погрешность составляет 0,95%

**5.61.** Вычислить удельную теплоту парообразования хладагента R125 при температуре 20 °С, если известно, что плотность насыщенной жидкости и сухого насыщенного пара при этой температуре соответственно равны 1219 и 77,66 кг/м<sup>3</sup>, а давление насыщения при температурах 19 и 21 °С составляет 1,1725 и 1,2381 МПа.

**Ответ:**  $r = 115,92 \text{ кДж/кг}$ .

**5.62.** Определить уклон кривой плавления льда в  $p$ - $T$  – координатах при температуре тройной точки 0,01 °С, если известно, что плотность воды и льда при этой температуре составляют 999,86 кг/м<sup>3</sup> и 916,8 кг/м<sup>3</sup>, а теплота плавления льда равна 333,3 кДж/кг.

**Ответ:**  $\frac{\partial p}{\partial T} = -13,466 \cdot 10^6 \text{ Па/К}$ .

**5.63.** Найти отношение плотностей хладагента R134a при  $p = 0,04 \text{ МПа}$  и  $t = -10 \text{ °С}$ , считая его реальным и идеальным газом.

**Ответ:**  $\frac{\rho_p}{\rho_{ид}} = 1,013$ .

**5.64.** Найти коэффициент (фактор) сжимаемости хладагента R125 в состоянии сухого насыщенного пара и насыщенной жидкости при температуре 20 °С.

**Ответ:**  $z' = 0,487$ ;  $z'' = 0,764$ .

**5.65.** Найти плотности равновесных фаз диоксида углерода в тройной точке ( $t = -56,57 \text{ °С}$ ), если известно, что уклоны кривых сублимации, плавления и парообразования в этой точке в  $p$ - $T$  – координатах составляют 34,07, 4629 и 22,26 кПа/К, а теплоты соответствующих фазовых переходов равны 531, 185 и 346 кДж/кг. Изобразить ориентировочное взаимное расположение кривых сублимации, плавления и парообразования в диаграмме  $p$ - $T$  в районе тройной точки.

**Ответ:**  $\rho_{тв} = 1505 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_{ж} = 1178 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_{п} = 13,77 \text{ кг/м}^3$ .

**5.66.** Во сколько раз изохорная и изобарная теплоемкости хладагента R22 при температуре 50 °С и давлении 1,53 МПа больше их идеальногогазовых значений?

**Ответ:**  $\frac{c_v^p}{c_v^{ид}} = \frac{0,672}{0,583} = 1,15$ ;  $\frac{c_p^p}{c_p^{ид}} = \frac{0,94}{0,679} = 1,38$ .

**5.67.** Определить значение показателя изоэнтропы (адиабаты) перегретого пара хладагента R125 при  $p_1 = 2,54 \text{ МПа}$  и  $t_1 = 60 \text{ °С}$  и при  $p_2 = 1,57 \text{ МПа}$  и  $t_2 = 40 \text{ °С}$ . Сравнить их со значениями  $k_0$  идеального газа при тех же параметрах, а также с отношениями теплоемкостей  $c_p/c_v$ .

**Дано:**  
 $t_1 = 60 \text{ °С}$   
 $p_1 = 2,54 \text{ МПа}$   
 $t_2 = 40 \text{ °С}$   
 $p_2 = 1,57 \text{ МПа}$

$k, k_0, c_p/c_v$  – ?

**Решение:**

Показатель изоэнтропы реального газа равен

$$k = \frac{p w^2}{p}$$

Используя табличные данные, находим

$$k_1 = \frac{166,9 \cdot 113,7^2}{2,54 \cdot 10^6} = 0,849$$

$$k_2 = \frac{95,4 \cdot 122,6^2}{1,57 \cdot 10^6} = 0,913$$

При указанных выше параметрах отношения изобарных теплоемкостей к изохорным равны

$$\frac{c_{p1}}{c_{v1}} = \frac{1,336}{0,875} = 1,527 \quad \text{и} \quad \frac{c_{p2}}{c_{v2}} = \frac{1,063}{0,818} = 1,3$$

Для идеального газа показатель политропы

$$k_0 = \frac{c_p^0}{c_v^0}$$

Для тех же температур найдем, предварительно определив экстраполяцией к нулевому значению давления значения теплоемкостей

$$k_1^0 = \frac{0,855}{0,784} = 1,09$$

$$k_2^0 = \frac{0,823}{0,752} = 1,094$$

Таким образом, значения показателя изоэнтропы реального газа существенно отличаются от его идеально-газовых

значений. Формулу  $k = \frac{c_p}{c_v}$  не следует использовать даже для

грубой оценки величины изоэнтропы  $\chi_A$  при высоких давлениях

**5.68.** Известно, что температура кипения аммиака при давлении 0,1 МПа равна -33,5 °С. Вывести приближенное уравнение, описывающее зависимость температуры кипения аммиака от давления в небольшом интервале давлений (от 0,15 до 0,08 МПа). При этом предположить, что среднее значение теплоты парообразования аммиака для данного интервала давлений равно 1360 кДж/кг. Полученное уравнение использовать для определения температуры насыщения аммиака в заданном интервале давлений, например, при 0,1253 МПа. Найденное значение температуры сравнить с табличным, определить, как увеличивается погрешность, если полученное уравнение экстраполировать на область значительно больших давлений, найдя, например, с помощью этого уравнения температуру насыщения при 0,43 МПа.

**Дано:**

$$t_1 = -33,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$p_1 = 0,1 \text{ МПа}$$

$$r = 1360 \text{ кДж/кг}$$

$$t_2 = 10 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$p_2 = 0,22196 \text{ МПа}$$

$$v' = 7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$v'' = 7,69 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$r - ?$$

**Решение:**

Исходным является уравнение Клапейрона-Клазиуса

$$r = \frac{T(v'' - v')}{\left(\frac{dp}{dT}\right)_n}$$

Упростим это уравнение, исключив из него  $v'$ , так как  $v'' \gg v'$ .

Полагая, что сухой насыщенный пар аммиака удовлетворительно подчиняется уравнению состояния идеального газа, определим

$$v'' = \frac{RT_n}{p_n},$$

тогда исходное уравнение примет вид

$$\left(\frac{dp}{dT}\right)_n = \frac{rp}{RT^2} \text{ или } \frac{(d \ln p)}{dT_n} = \frac{r}{RT^2}$$

после интегрирования (полагая  $r = \text{const}$ ) получим

$$\ln p = -\frac{r}{RT} + c$$

Постоянную интегрирования найдем, используя данные из условия:

$$p_1 = 0,1 \text{ МПа}$$

$$T_n = 239,6 \text{ К}$$

$$c = \ln 10^5 + \frac{1360000}{488,16 \cdot 239,6} = 23,14$$

Окончательно уравнение примет вид

$$\ln p = \frac{-1360000}{488,16} \cdot \frac{1}{T} + 23,14 = \frac{-2786}{T} + 23,14$$

1) При  $p = 125,4 \text{ кПа}$  температура насыщения равна

$$T_n = \frac{2786}{23,14 - \ln 125400} = 273,9 \text{ К} = 0,75 \text{ }^\circ\text{C}$$

Табличное значение

$$t_n = 0 \text{ }^\circ\text{C}$$

**5.69.** Аммиак массой 20 кг при постоянном давлении  $p = 0,19 \text{ МПа}$  нагревают от начальной температуры  $t_1 = -25 \text{ }^\circ\text{C}$  до состояния, в котором плотность становится равной  $1/500$  начального значения. Определить количество подведенной к аммиаку теплоты. Во сколько раз уменьшится плотность идеального газа при изобарном нагревании его в том же интервале температур?

$$\text{Ответ: } Q = 29 \text{ МДж; } \left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)_{\text{ид}} = 1,2.$$

**5.70.** Уравнение кривой упругости для хладагента R12 имеет вид  $\ln p = A + B/\tau + C\tau^3 + D \ln \tau$ , где  $\tau = T/T_{\text{кр}}$ ;  $A = 12,6593653$ ;  $B = -9,8414200$ ;  $C = 0,9031290$ ;  $D = -5,8891780$ . Определить давление насыщения R12 при температурах  $-30$  и  $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ . Полученные результаты сравнить с табличными.

**Ответ:** при  $t_n = -30 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\ln(p) = 0,005982$ ;  $p = 0,1006 \text{ МПа}$ ;

табличное значение  $p = 0,1006 \text{ МПа}$ ;

при  $t_n = -15 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\ln(p) = 0,6043$ ;  $p = 0,183 \text{ МПа}$ ;

табличное значение  $p = 0,183 \text{ МПа}$ .

**5.71.** В результате экспериментальных исследований найдено, что давление насыщенного пара хладагента R22 при температуре  $-43,555 \text{ }^\circ\text{C}$  равно  $0,8914 \text{ бар}$ , а при температуре  $-10,300 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $3,5108 \text{ бар}$ . Полученные экспериментальные данные описать уравнением вида  $\ln p = A + B/T$ .

**Ответ:** 1) для температуры  $-43,555\text{ }^{\circ}\text{C}$  имеем:

$$\ln 0,8914 = A + \frac{B}{229,595};$$

2) для температуры  $-10,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  имеем:

$$\ln 3,5108 = A + \frac{B}{262,85}$$

Решая систему уравнений с двумя неизвестными, находим:  $A=11,569$ ;  $B=-2682,6$

Таким образом, уравнение кривой упругости для R22

$$\text{будет иметь вид } \ln p = 11,569 - \frac{2682,6}{T}$$

**5.72.** Используя полученное в задаче 5.71 уравнение кривой упругости для хладагента R22, определить давление насыщения при температурах  $-30$  и  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Данные расчета сравнить с табличными значениями давлений.

**Ответ:** при  $t_{\text{н}}=-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ :  $\ln(p)=0,5363$ ;  $p=0,171\text{ МПа}$ ;

табличное значение  $p=0,1006\text{ МПа}$ ;

погрешность составляет  $4,2\%$ .

при  $t_{\text{н}}=0\text{ }^{\circ}\text{C}$ :  $\ln(p)=1,748$ ;  $p=0,574\text{ МПа}$ ;

табличное значение  $p=0,496\text{ МПа}$ ;

погрешность составляет  $-15,2\%$ .

## Глава 6. Процессы течения газов и жидкостей. Дросселирование

В современной технике процесс течения широко применяется в различного рода турбинах, реактивных двигателях, в технике низких температур. При решении задач, связанных с течением из сопла, чаще всего приходится определять скорость движения газа (жидкости), выходящего из сопла,  $w_2$  и массовый расход  $M$ . Для этого необходимо прежде всего знать отношение давлений среды на выходе из сопла ( $p_2$ ) и на входе в него ( $p_1$ ). Найденное значение  $\beta$  сравнивают с так называемым критическим отношением давлений, которое определяется из уравнения

$$\beta_{\text{кр}} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}. \quad (6.1)$$

Для одноатомных газов  $\beta_{\text{кр}} = 0,487$ , двухатомных  $\beta_{\text{кр}} = 0,528$ , для трех- и многоатомных  $\beta_{\text{кр}} = 0,546$ .

Если адиабатное истечение газа характеризуется  $\beta > \beta_{\text{кр}}$ , то теоретическую скорость движения газа, выходящего из цилиндрического или суживающегося конического сопла, определяют по формуле

$$w_2 = \sqrt{2(h_1 - h_2)} \quad (6.2)$$

или

$$w_2 = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left( 1 - \beta^{\frac{k-1}{k}} \right)}, \quad (6.3)$$

где  $h_1$  и  $h_2$  – энтальпии газа, входящего в сопло и выходящего из него, Дж/кг;  
 $v_1$  – удельный объем газа, входящего в сопло, м<sup>3</sup>/кг.

Массовый расход газа находят из уравнения

$$M = f_2 \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{v_1} \left( \beta^{\frac{2}{k}} - \beta^{\frac{k+1}{k}} \right)}, \quad (6.4)$$

где  $f_2$  – выходное сечение сопла, м<sup>2</sup>.

Если адиабатное истечение газа характеризуется  $\beta \leq \beta_{\text{кр}}$ , то теоретическая скорость движения газа, выходящего из цилиндрического или суживающегося конического сопла, будет равна критической скорости

$$w_{2\text{кр}} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} p_1 v_1} \quad (6.5)$$

или, для двухатомных газов

$$w_{2\text{кр}} = 1,08 \sqrt{p_1 v_1} \quad (6.6)$$

Можно показать, что критическая скорость равна скорости звука для местных условий. В этом случае расход газа будет максимальным, и его можно определить из уравнения

$$M_{\text{max}} = f_2 \sqrt{2 \frac{k}{k+1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} \frac{p_1}{v_1}} \quad (6.7)$$

или для двухатомных газов

$$M_{\text{max}} = 0,686 f_2 \sqrt{\frac{p_1}{v_1}}. \quad (6.8)$$

Для получения сверхзвуковых скоростей при истечении применяют сопло сложной конфигурации (сопло Лаваля). В минимальном сечении такого сопла скорость движения газа равна критической. Площадь минимального сечения сопла определяют по формуле

$$f_{\text{min}} = \frac{M_{\text{max}} v_{\text{кр}}}{w_{2\text{кр}}}, \quad (6.9)$$

где  $v_{\text{кр}}$  – удельный объем газа в минимальном сечении, находится из соотношения параметров адиабатного процесса:

$$\frac{v_{\text{кр}}}{v_1} = \left( \frac{p_1}{p_{\text{кр}}} \right)^{\frac{1}{k}},$$

в свою очередь,  $p_{\text{кр}} = \beta p_1$ .

Площадь выходного сечения сопла рассчитывают по уравнению

$$f_2 = f_{\min} \frac{w_{2\text{кр}} v_2}{w_2 v_{\text{кр}}} . \quad (6.10)$$

Длину расширяющейся части сопла находят по формуле

$$l = \frac{d - d_{\min}}{2 \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} , \quad (6.11)$$

где  $d$  и  $d_{\min}$  – диаметры, соответственно, выходного и минимального сечений;  $\alpha$  – угол конусности расширяющейся части сопла (обычно равен 10-12 °).

Процесс дросселирования находит широкое применение в холодильной технике. В процессе дросселирования газа или пара наряду с понижением давления всегда увеличивается удельный объем. При этом полезная работа не совершается, что свидетельствует о необратимости процесса дросселирования. При протекании процесса дросселирования энтропия газа (пара) возрастает. При дросселировании температура идеальных газов остается неизменной, а температура реальных газов может как понижаться, так и повышаться. Неизменной она остается только в том случае, когда начальная температура газа равна температуре инверсии ( $T_{\text{инв}} \cong 6,75T_{\text{кр}}$ ). Основной закономерностью процесса дросселирования является равенство энтальпий в начальном и конечном состояниях газа (пар):  $h_1 = h_2$ .

## Задачи

**6.1.** Выбрать профиль сопла, если давление воздуха на входе в сопло 10 МПа, а на выходе давление в одном случае равно 0,1 МПа, а в другом 6 МПа.

*Ответ:* 1) сопло Лаваля; 2) суживающееся сопло.

**6.2.** В цилиндрическое сопло поступает перегретый пар аммиака с начальным давлением 1,5 МПа. До какого давления можно расширить пар, выходящий из сопла?

<i>Дано:</i> $p_1 = 1,5$ МПа	<i>Решение:</i> Для аммиака $k = 1,3$
$p_2 = ?$	$\beta_{кр} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = \left( \frac{2}{1,3+1} \right)^{\frac{1,3}{1,3-1}} = 0,545$ <p>Давление аммиака на выходе из сопла</p> $p_2 = \beta_{кр} p_1 = 0,545 \cdot 1,5 = 0,818 \text{ МПа}$

**6.3.** Через суживающееся сопло азот адиабатно вытекает из сосуда, в котором поддерживаются постоянное давление 5 МПа и температура 27 °С, в среду с давлением 3 МПа. Определить скорость истечения азота, выходящего из сопла, массовый расход, если площадь выходного сечения сопла 30 мм<sup>2</sup>, скорость истечения и расход азота, если давление среды, куда от истекает, понизится до 0,1 МПа.

<i>Дано:</i> $p_1 = 5$ МПа $t_1 = 27$ °С $p_2 = 3$ МПа $f_2 = 30$ мм <sup>2</sup> $p_3 = 0,1$ МПа	<i>Решение:</i>
$p_2 = ?$	<p>1) <math>\beta_1 = \frac{p_2}{p_1} = \frac{3}{5} = 0,6</math> , <math>\beta_{кр} = 0,528</math> - для двухатомных газов</p> <p><math>\beta_1 &gt; \beta_{кр}</math></p> $v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{296,8 \cdot 300}{5 \cdot 10^6} = 0,0178 \text{ м}^3/\text{кг}$ $w_2 = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left( 1 - \beta^{\frac{k-1}{k}} \right)} = \sqrt{2 \frac{1,4}{1,4-1} \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot 0,0178 \left( 1 - 0,6^{\frac{0,4}{1,4}} \right)} = 292 \text{ м/с}$ $M = f_2 \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{v_1} \left( \beta^{\frac{2}{k}} - \beta^{\frac{k+1}{k}} \right)} = 3 \cdot 10^5 \sqrt{\frac{2 \cdot 1,4}{1,4-1} \cdot \frac{5 \cdot 10^6}{0,0178} \left( 0,6^{\frac{2}{1,4}} - 0,6^{\frac{2,4}{1,4}} \right)}$ <p><math>M = 0,337</math> кг/с</p> <p>2) <math>\beta_2 = \frac{p_2}{p_1} = \frac{0,1}{5} = 0,02</math> , <math>\beta_{кр} = 0,528</math> - для двухатомных газов</p> <p><math>\beta &lt; \beta_{кр}</math> , значит, скорость истечения максимальна и равна скорости звука для местных условий, массовый расход также достигает максимума.</p> $w_{2кр} = 1,08 \sqrt{RT_1} = 1,08 \sqrt{296,8 \cdot 300} = 322 \text{ м/с}$ $M_{\max} = 0,686 f_2 \sqrt{\frac{p_1}{v_1}} = 0,686 \cdot 3 \cdot 10^5 \sqrt{\frac{5 \cdot 10^6}{0,0178}} = 0,345 \text{ кг/с}$

**6.4.** Перегретый пар хладагента R22 адиабатно истекает через суживающееся сопло в среду с давлением 0,6 МПа. Перед соплом пар имеет параметры:  $p_1=1,0$  МПа и  $t_1=50$  °С. Определить скорость движения и температуру пара, выходящего из сопла. Температуру найти как расчетным путем, так и с помощью диаграммы.

**Ответ:**  $w_2=169$  м/с;  $T_2=301$  К (расч);  $T_2=298$  К (диагр.).

**6.5.** Для случая, описанного в задаче **6.5**, рассчитать размеры сопла, позволяющего осуществить полное расширение газа и довести расход газа до 5 кг/с. Определить также скорость истечения газа, выходящего из сопла.

**Дано:**  
 $p_1=2,0$  МПа  
 $t_1=127$  °С  
 $p_2=0,2$  МПа

$p_3; w_2=?$

**Решение:**

определяем уд. объем углекислого газа:  
на входе в сопло

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{188,9 \cdot 400}{2 \cdot 10^6} = 0,0378 \text{ м}^3/\text{кг}$$

в минимальном сечении сопла, где  $p_{2кр}=1,09$  МПа

$$v_{2кр} = \frac{v_1}{\beta_{кр}^k} = \frac{0,0378}{0,545^{1,3}} = 0,06 \text{ м}^3/\text{кг}$$

в выходном сечении сопла, где  $p_2=0,2$  МПа

$$v_2 = \frac{v_1}{\beta^k} = \frac{0,0378}{0,1^{1,3}} = 0,222 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Определяем площадь минимального сечения сопла:

$$f_{\min} = \frac{M_{\max} v_{кр}}{w_{2кр}} = \frac{0,5 \cdot 0,06}{292} = 102,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

Диаметр минимального сечения сопла:

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{\pi f_{\min}}{4}} = \sqrt{\frac{102,6}{0,785}} = 11,4 \text{ мм}$$

Скорость в выходном сечении сопла:

$$w_2 = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} RT_1 \left( 1 - \beta^{\frac{k-1}{k}} \right)} = \sqrt{2 \frac{1,3}{1,3-1} 188,9 \cdot 400 \left( 1 - 0,1^{\frac{0,3}{1,3}} \right)} = 519 \text{ м/с}$$

Площадь выходного сечения

$$f_2 = \frac{M v_2}{w_2} = \frac{0,5 \cdot 0,222}{519} = 214 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

Диаметр выходного сечения сопла:

$$d_2 = \sqrt{\frac{\pi f_2}{4}} = \sqrt{\frac{214}{0,785}} = 16,5 \text{ мм}$$

Приняв угол конусности расширяющейся части сопла  $\alpha=12^\circ$ , найдем длину расширяющейся части

$$l = \frac{d_2 - d_{\min}}{2 \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} = \frac{16,5 - 11,4}{2 \cdot \operatorname{tg} \frac{12}{2}} = 24,1 \text{ мм}$$

**6.6.** Из суживающегося сопла в среду с давлением 0,2 МПа адиабатно истекает диоксид углерода с начальным давлением 2,0 МПа и температурой 127 °С. Определить скорость истечения газа, выходящего из сопла, а также до какого давления удастся расширить газ в выходном сечении сопла.

**Ответ:**  $w_{2кр}=292$  м/с;  $p_2=1,09$  МПа

**6.7.** Рассчитать площади наиболее узкого и выходного сечений сопла, из которого истекает воздух. Параметры воздуха, входящего в сопло:  $p_1=1,0$  МПа и  $t_1=807$  °С. Давление за соплом  $p_2=0,1$  МПа. Расход воздуха должен быть равен 0,3 кг/с. Процесс истечения считать адиабатным.

**Ответ:**  $f_{min}=244 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>;  $f_2=472 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>.

**6.8.** Определить скорость истечения воздуха через суживающееся сопло и его конечную температуру, если дано:  $p_1=8,0$  МПа,  $p_2=5,0$  МПа и  $t_1=17$  °С.

**Ответ:**  $w_2=271$  м/с;  $T_2=254$  К.

**6.9.** Водяной пар при давлении 1,6 МПа и температуре 300 °С поступает в сопло Лавалья. Давление среды, в которую адиабатно истекает пар 0,1 МПа. Минимальная площадь сечения сопла 10 см<sup>2</sup>. Определить расход пара и скорость его движения на выходе из сопла.

**Ответ:**  $w_2=1040$  м/с;  $M=2,1$  кг/с.

**6.10.** Рассчитать основные размеры сопла, позволяющего произвести адиабатное расширение 5 кг/с хладагента R22 от начальных параметров  $p_1=2,997$  МПа и  $t_1=90$  °С до давления среды  $p_2=0,9097$  МПа.

**Ответ:** Для сопла Лавалья -  $f_{min}=4,32 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>;  $d_{min}=0,0184$  м  
 $f_2=5,38 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>;  $d_2=0,0206$  м;  $l=0,0158$  м ( $\alpha=9^\circ$ )

**6.11.** Во сколько раз можно увеличить скорость движения воздуха, адиабатно истекающего из сосуда, в котором поддерживается постоянное давление воздуха 3,0 МПа, если вместо цилиндрического сопла использовать сопло Лавалья и доводить расширение воздуха до давления окружающей среды, равного 0,12 МПа?

**Ответ:** При использовании сопла Лавалья скорость движения воздуха возрастет в 1,9 раза.

**6.12.** Перегретый водяной пар с начальным давлением 1,8 МПа и температурой 350 °С адиабатно расширяется в сопле до давления 0,1 МПа. Расход пара 3 кг/с. Определить минимальное и выходное сечение сопла.

**Ответ:**  $f_{min}=0,00132$  м<sup>2</sup>;  $f_2=0,00436$  м<sup>2</sup>.

**6.13.** В баллоне вместимостью 50 л содержится жидкий аммиак (3 кг). В стенке баллона, находящегося в контакте с паром аммиака, образовалось отверстие, площадь сечения которого 2 мм<sup>2</sup>. Баллон стоит в помещении, температура воздуха в котором 17 °С. Через какое время в баллоне не останется жидкого аммиака? Атмосферное давление 1000 гПа. Принять коэффициент расхода для истечения через образовавшееся отверстие  $\mu=0,7$ .

<p><b>Дано:</b>  <math>V=50</math> л  <math>M_{ж}=3</math> кг  <math>f=2</math> мм<sup>2</sup>  <math>t_1=17</math> °С  <math>B=1000</math> гПа  <math>\mu=0,7</math></p>	<p><b>Решение:</b>  объем, занимаемый жидким аммиаком:  <math>V_{ж} = v' M_{ж} = 1,63 \cdot 10^{-3} \cdot 3 = 4,89 \cdot 10^{-3}</math> м<sup>3</sup>  объем, занимаемый жидким аммиаком:  <math>V_{п} = V - V_{ж} = 50 \cdot 10^{-3} - 4,89 \cdot 10^{-3} = 45,11 \cdot 10^{-3}</math> м<sup>3</sup>  Масса насыщенного пара аммиака  <math>M_{п} = V_{п} \cdot \rho'' = 45,11 \cdot 10^{-3} \cdot 6,106 = 0,275</math> кг  Масса всего аммиака в баллоне  <math>M = M_{ж} + M_{п} = 3,275</math> кг  Масса насыщенного пара аммиака, оставшегося в баллоне после выкипания жидкости  <math>M_{п} = V \rho'' = 50 \cdot 10^{-3} \cdot 6,106 = 0,305</math> кг  Масса аммиака, который истекает из баллона к моменту выкипания всей жидкости  <math>\Delta M = 3,275 - 0,305 = 2,97</math> кг  Приняв показатель адиабаты для аммиака <math>k=1,3</math>; определим  <math display="block">\beta_{кр} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = \left( \frac{2}{1,3+1} \right)^{\frac{1,3}{1,3-1}} = 0,545</math> Давление паров аммиака в баллоне при <math>t_H=17</math> °С составляет <math>p_1=0,778</math> МПа  Давление окружающего воздуха <math>p_2=B=0,1</math> МПа, тогда  <math display="block">\beta_1 = \frac{p_2}{p_1} = \frac{0,1}{0,78} = 0,128 &lt; \beta_{кр}</math> Для приближенного решения задачи сделаем допущения:  - пар аммиака подчиняется законам идеальных газов;  - образовавшееся отверстие можно считать соплом постоянного сечения.  Тогда  <math display="block">M_{\max} = f_2 \sqrt{2 \frac{k}{k+1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} \frac{p_1}{v_1}} =</math> <math display="block">M_{\max} = 2 \cdot 10^{-6} \sqrt{\frac{2 \cdot 1,3}{1,3-1} \cdot \left( \frac{2}{1,3+1} \right)^{\frac{2}{1,3-1}} \frac{0,778 \cdot 10^6}{0,163}} = 2,95 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}</math> С учетом коэффициента расхода  <math>M_{\max} = 2,95 \cdot 10^{-3} \cdot 0,7 = 2,06 \cdot 10^{-3}</math> кг/с  Время, за которое выкипит вся жидкость  <math display="block">\tau = \frac{\Delta M}{M_{\max}} = \frac{2,97 \cdot 10^3}{2,06 \cdot 3600} = 0,4 \text{ ч}</math></p>
<p><math>\tau=?</math></p>	

**6.14.** В одну из емкостей холодильной установки подается перегретый пар аммиака в количестве 1260 кг/ч. Температура пара 70 °С. Каким должно быть сечение предохранительного клапана, чтобы при внезапном прекращении отбора аммиака давление в емкости не превысило 1,0 МПа? Атмосферное давление 1000 гПа.

**Дано:**

$M_{\text{п}}=1260$  кг/ч  
 $t_1=70$  °С  
 $p_1=1,0$  МПа  
 $V=1000$  гПа

$\tau=?$

**Решение:**

Для приближенного решения задачи сделаем допущения:

- пар аммиака подчиняется законам идеальных газов;
- образовавшееся отверстие можно считать соплом постоянного сечения.

**Способ 1**

Приняв показатель адиабаты для аммиака  $k=1,3$ ; определим

$$\beta_{\text{кр}} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = \left( \frac{2}{1,3+1} \right)^{\frac{1,3}{1,3-1}} = 0,545$$

$$\beta_1 = \frac{p_2}{p_1} = \frac{0,1}{1} = 0,1 < \beta_{\text{кр}}$$

Давление на выходе из сопла составляет

$$p_2 = p_1 \beta_{\text{кр}} = 1 \cdot 0,545 = 0,545 \text{ МПа}$$

Удельный объем перегретого пар находим по табл. перегретого пара аммиака

$$v_1 = 0,156 \text{ м}^3/\text{кг}$$

массовый расход

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

Откуда

$$f = \frac{\frac{1260}{3600}}{\sqrt{2 \frac{1,3}{1,3+1} \left( \frac{2}{1,3+1} \right)^{\frac{2}{1,3-1}} \cdot \frac{10^6}{0,156}}} = 0,000206 \text{ м}^2$$

**Способ 2**

С помощью диаграммы  $\lg p-h$

Находим энтальпию перегретого пара аммиака, входящего в сопло по  $p_1$  и  $t_1$

$$h_1 = 1907,5 \text{ кДж/кг}$$

Состояние пара, выходящего из сопла, находим в пересечении адиабаты, проведенной через точку 1, и изобары  $p_2=0,545$  МПа

$$h_{2\text{кр}} = 1816 \text{ кДж/кг}$$

$$v_{2\text{кр}} = 0,25 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$M_{\text{max}} = \frac{44,76 f \sqrt{h_1 - h_{2\text{кр}}}}{v_{2\text{кр}}},$$

$$f_2 = \frac{M_{\text{max}} v_{2\text{кр}}}{44,76 \sqrt{h_1 - h_{2\text{кр}}}} = \frac{0,35 \cdot 0,25}{44,76 \sqrt{1907,5 - 1816}} = 0,000204 \text{ м}^2$$

Расхождение при двух способах расчета составляет 1%

**6.15.** Пар хладагента R125 при давлении 2,01 МПа и температуре 80 °С вытекает из суживающегося сопла в среду с давлением 0,094 МПа. Определить состояние и параметры хладагента при истечении, а также скорость истечения.

**Ответ:** Пар – перегретый;  $p_{2\text{кр}}=1,24$  МПа;  $t_2=61$  °С;

$$h_{2кр}=681 \text{ кДж/кг}; w_{2кр}=147,6 \text{ м/с}.$$

**6.16.** Продукты сгорания газотурбинной установки истекают адиабатно через сопло Лаваля в атмосферу ( $B=1000$  гПа). Начальные параметры продуктов сгорания: давление – 1,0 МПа, температура 300 °С, расход – 5 кг/с. Определить скорость истечения продуктов сгорания на выходе из сопла и основные размеры сопла. Физические свойства продуктов сгорания принять такими же, как и у воздуха.

**Ответ:**  $w_2=744$  м/с;  $f_{\min}=2,94 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ ;  $f_2=5,71 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ .  
 Длина расширяющейся части сопла при угле конусности  $10^\circ$  составляет 13 см.

**6.17.** Воздух попадает в суживающуюся насадку. Начальная температура его 7 °С, а скорость движения 350 м/с. Определить, как будет работать насадка (как сопло или как диффузор).

<p><b>Дано:</b>  <math>t_1=7^\circ\text{C}</math>  <math>w_2=350 \text{ м/с}</math></p>	<p><b>Решение:</b>                  Скорость звука в воздухе при <math>t_1=7^\circ\text{C}</math>  <math>a = \sqrt{kRT} = \sqrt{1,4 \cdot 287 \cdot 280} = 335 \text{ м/с}</math>                  Зависимость изменения площади сечения канала от изменения давления газа в нем  <math display="block">df = \frac{f}{w_{кр}^2} (a^2 - w^2) dp,</math>                  где всегда <math>\frac{f}{w_{кр}^2} &gt; 0</math>.                  В данном случае <math>df &lt; 0</math> и <math>(a^2 - w^2) &lt; 0</math>,                  значит  <math>dp &gt; 0</math> и насадка работает как диффузор</p>
<p>?</p>	

**6.18.** Перегретый водяной пар поступает в расширяющуюся насадку. Параметры пара:  $p_1=10$  МПа и  $v_1=0,0328$  м<sup>3</sup>/кг, скорость движения 400 м/с. Определить, как будет работать насадка (как сопло или как диффузор).

**Ответ:**  $dp > 0$  - насадка работает как диффузор.

**6.19.** На входе в цилиндрическое сопло водяной пар движется со скоростью 150 м/с и имеет температуру 200 °С и давление 0,5 МПа. Каким бы стали температура и давление пара на выходе из сопла, если бы от пара было отведено теплоты 35,5 кДж/кг, а энтальпия его при этом уменьшилась бы на 52 кДж/кг?

**Ответ:**  $p_2=0,3$  МПа;  $t_2=170$  °С.

**6.20.** Какое количество теплоты следует подвести к 1 кг расширяющегося в цилиндрическом сопле водяного пара, чтобы его температура, равная 250 °С, осталась неизменной при падении давления от 0,4 до 0,25 МПа? Скорость пара на входе в сопло равна 30 м/с.

**Ответ:**  $q=5,7$  кДж/кг.

**6.21.** Диаметр выходного сечения сопла в 1,2 раза меньше входного диаметра. От расширяющегося в сопле водяного пара отводится 23,5 кДж/кг теплоты, при этом давление и температура пара понижается от 0,2 до 0,15 МПа и от 200

до 180 °С, соответственно. Найти скорости движения пара на входе и выходе из сопла.

**Ответ:**  $w_1=108,6$  м/с;  $w_2=200$  м/с.

**6.22.** При движении воздуха по суженному участку системы кондиционирования его давление падает от 1040 до 1013 гПа. Определить изменение энтропии воздуха при его дросселировании на этом участке.

<p><b>Дано:</b>  <math>p_1=1040</math> гПа  <math>p_2=1013</math> гПа</p>	<p><b>Решение:</b>          Полагая, что воздух в данных условиях подчиняется законам идеальных газов, считаем его температуру при дросселировании неизменной, тогда:</p>
<p><math>\Delta s</math> –?</p>	<p><math display="block">\Delta s = -R \ln \left( \frac{p_2}{p_1} \right) = R \ln \left( \frac{p_1}{p_2} \right) = 287 \ln \left( \frac{1040}{1013} \right) = 7,9 \text{ кДж/(кг К)}</math></p>

**6.23.** Водяной пар с начальным давлением 2,0 МПа и температурой 250 °С адиабатно дросселируется до давления 1,0 МПа. Как изменится перегрев пара?

**Ответ:** Перегрев пара увеличился на 12 К.

**6.24.** Какова должна быть начальная степень сухости водяного пара, чтобы, адиабатно дросселируя его от давления 10 бар, получить сухой насыщенный пар с давлением 0,08 бар?

**Ответ:**  $x_1=0,9$ .

**6.25.** В регулирующий вентиль холодильной машины поступает насыщенная жидкость аммиака при 37 °С. В вентиле происходит процесс адиабатного дросселирования и давление падает до 9104 Па. Какая доля жидкости превращается в сухой насыщенный пар?

**Ответ:** В пар превратится 25% жидкости.

**6.26.** До какого давления необходимо адиабатно дросселировать влажный насыщенный пар аммиака ( $p_1=1,2$  МПа,  $x_1=0,95$ ), чтобы он стал сухим насыщенным?

**Ответ:**  $p_2=0,105$  МПа.

**6.27.** Какое количество теплоты нужно подвести к 1 кг хладагента R22, дросселирующегося от давления 0,4 МПа до давления 0,1 МПа через капиллярную трубку, чтобы его температура осталась неизменной и равной 0 °С?

**Ответ:**  $q=6,2$  кДж/кг.

**6.28.** Состояние водяного пара на входе и выходе из дроссельного вентиля – сухой насыщенный пар. Определить конечную температуру и давление пара после вентиля, если перед дросселем его давление составляет 8,5 МПа.

**Ответ:**  $p_2=0,52$  МПа;  $t_2=153$  °С.

**6.29.** Сухой насыщенный пар хладагента R22 с начальной температурой -16 °С адиабатно дросселируется до пятикратного увеличения объема. Определить температуру хладагента после дросселирования.

**Ответ:**  $T_2=246$  К.

**6.30.** Давление в конденсаторе холодильной машины, работающей на R22, 1,2 МПа. Можно ли путем адиабатного дросселирования насыщенной жидкости хладона

получить в конце процесса температуру, равную  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , если при этом степень сухости хладагента не превышает 30%?

**Ответ:** Дросселирование до  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  вызовет увеличение степени сухости до значения, превосходящее заданное.

**6.31.** Какой будет температура сухого насыщенного пара хладагента R22, полученного путем адиабатного дросселирования хладагента от начального состояния, соответствующего критическому?

**Ответ:**  $T_n = 193\text{ K}$ .

**6.32.** Сухой насыщенный пар аммиака при давлении 5,66 МПа поступает в дроссельный вентиль. Выходит, из дросселя также сухой насыщенный пар. Определить температуру и плотность пара на выходе из дросселя.

**Ответ:**  $t_2 = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $\rho_2 = 2,39\text{ кг/м}^3$ .

**6.33.** Пользуясь таблицами термодинамических свойств, определить изменение температуры при адиабатном дросселировании перегретого пара хладагента R22 от начального состояния, определяемого параметрами: давление – 20 бар, температура –  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ , до давления 6 бар.

**Ответ:**  $T_2 = 319\text{ K}$ .

**6.34.** Известно, что при давлении 1,0 МПа и температуре  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  теплоемкость пара аммиака  $c_p = 2,55\text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ . Определить дифференциальный эффект при указанных параметрах.

**Дано:**  
 $p = 1,0\text{ МПа}$   
 $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$   
 $c_p = 2,55\text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$

?

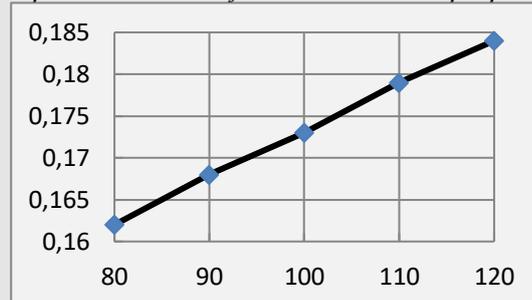
**Решение:**

Выпишем из таблиц термодинамических свойств аммиака несколько значений удельного объема перегретого пара в зависимости от температуры

$p = 1,0\text{ МПа}$

$t$	$^{\circ}\text{C}$	80	90	100	110	120
$v$	$\text{м}^3/\text{кг}$	0,162	0,168	0,173	0,179	0,184

Представим эту зависимость графически



Путем графического дифференцирования найдем производную

$$\left(\frac{dv}{dT}\right)_p = \frac{0,180 - 0,163}{115 - 83} = 0,00053\text{ м}^3/(\text{кг}\cdot\text{K})$$

Дифференциальный дроссельный эффект

$$\alpha_h = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_h = \frac{T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v}{c_p}$$

$$\alpha_h = \frac{373 \cdot 0,00053 - 0,173}{2500} = 9,8 \cdot 10^{-6}\text{ К/Па}$$

## Глава 7. Циклы газовых машин

Цикл двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты в изохорном процессе (цикл Отто) состоит из следующих процессов (рис. 7.1): 1-2 – адиабатное сжатие горючей смеси; 2-3 – изохорный подвод теплоты; 3-4 – адиабатное расширение продуктов сгорания; 4-1 – изохорное отведение теплоты.

Тепловой баланс цикла записывается в виде

$$q_1 = l_{\text{ц}} + |q_2|, \quad (7.1)$$

где подведенная теплота

$$q_1 = c_{vm} (T_3 - T_2) \quad (7.2)$$

и отведенная теплота

$$|q_2| = c_{vm} (T_4 - T_1). \quad (7.3)$$

Характеристики цикла следующие:

степень сжатия

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}, \quad (7.4)$$

степень повышения давления

$$\lambda = \frac{p_3}{p_2}, \quad (7.5)$$

термический КПД цикла

$$\eta_t = \frac{l}{q_1} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}. \quad (7.6)$$

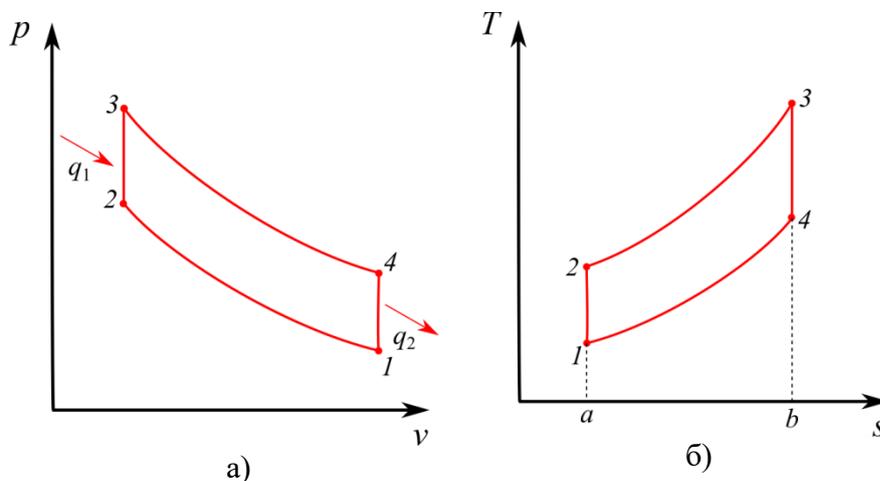


Рис.7.1. Изображение цикла двигателя внутреннего сгорания с изохорным подводом теплоты в рабочей (а) и тепловой (б) диаграммах.

Цикл двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты в изобарном процессе (цикл Дизеля) состоит из следующих процессов (рис.7.2): 1-2 – адиабатное сжатие воздуха; 2-3 – изобарное подведение теплоты (горение топлива); 3-4 – адиабатное расширение продуктов горения; 4-1 – изохорное отведение теплоты.

Тепловой баланс цикла

$$q_1 = l_{\text{ц}} + |q_2|,$$

где подведенная теплота

$$q_1 = c_{pm}(T_3 - T_2), \quad (7.7)$$

и отведенная теплота

$$|q_2| = c_{vm}(T_4 - T_1). \quad (7.8)$$

Характеристики цикла следующие:

степень сжатия

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2},$$

степень предварительного расширения

$$\rho = \frac{v_3}{v_2}, \quad (7.9)$$

термический КПД цикла

$$\eta_t = \frac{l}{q_1} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\rho^k - 1}{k(\rho - 1)}. \quad (7.10)$$

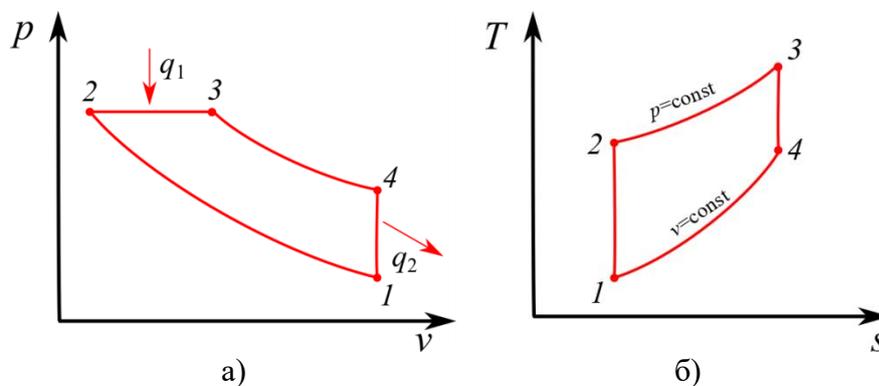


Рис.7.2. Изображение цикла двигателя внутреннего сгорания с изобарным подводом теплоты в рабочей (а) и тепловой (б) диаграммах.

Цикл газотурбинной установки со сгоранием топлива при постоянном давлении (рис. 7.3) состоит из следующих процессов: 1-2 – адиабатное сжатие воздуха; 2-3 – изобарный подвод теплоты (сгорание топлива); 3-4 – адиабатное расширение продуктов сгорания; 4-1 – условный процесс изобарного отвода теплоты.

Тепловой баланс цикла

$$q_1 = l_{ц} + |q_2|,$$

где подведенная теплота

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

и отведенная теплота

$$|q_2| = c_{pm}(T_4 - T_1). \quad (7.11)$$

Характеристики цикла следующие:

степень сжатия

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2},$$

степень повышения давления

$$\lambda = \frac{p_3}{p_2}, \quad (7.12)$$

термический КПД цикла

$$\eta_t = \frac{l}{q_1} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}. \quad (7.13)$$

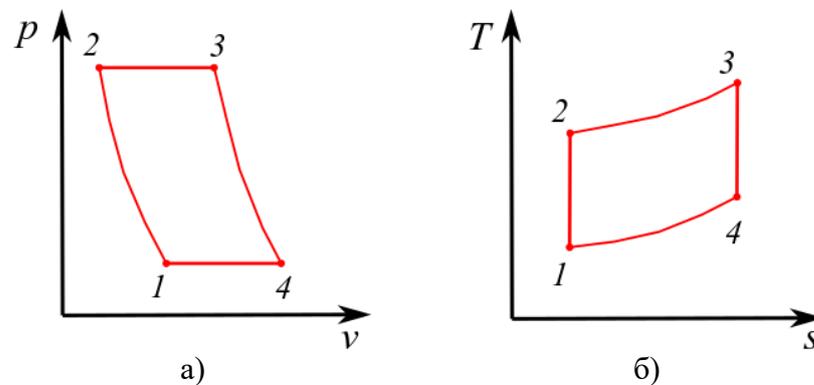


Рис.7.3. Изображение цикла газотурбинной установки в рабочей (а) и тепловой (б) диаграммах.

Цикл газотурбинной установки со сгоранием топлива при постоянном объеме состоит из адиабатного сжатия воздуха, изохорного подвода теплоты (сгорания топлива), адиабатного расширения продуктов сгорания и условного изобарного процесса отвода теплоты.

В газотурбинных установках часто осуществляется так называемая регенерация, т.е. предварительный подогрев сжатого в компрессоре воздуха за счет теплоты уходящих газов. Термический КПД цикла газовой турбины с регенерацией выше, чем термический КПД цикла без регенерации.

Цикл воздушной холодильной машины является обратным циклом. Он состоит из следующих процессов (рис.7.4): 1-2 – адиабатное сжатие воздуха в компрессоре; 2-3 – изобарное охлаждение сжатого воздуха; 3-4 – адиабатное расширение воздуха в детандере; 4-1 – изобарный подвод теплоты к воздуху от тел, подлежащих охлаждению.

Тепловой баланс цикла

$$|q_1| = |l_{\text{н}}| + q_2, \quad (7.14)$$

где подведенная теплота

$$|q_1| = c_{pm} (T_2 - T_3), \quad (7.15)$$

и отведенная теплота

$$q_2 = c_{pm} (T_1 - T_4), \quad (7.16)$$

холодильный коэффициент цикла

$$\varepsilon = \frac{q_2}{|l_{\text{н}}|} = \frac{T_1}{T_2 - T_1}. \quad (7.17)$$

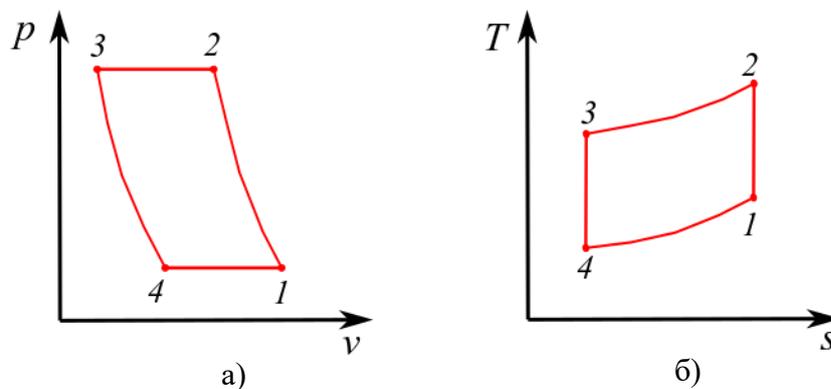


Рис.7.4. Изображение цикла воздушной холодильной машины (ВХМ) в рабочей (а) и тепловой (б) диаграммах.

## Задачи

**7.1.** Рассчитать цикл двигателя внутреннего сгорания с изохорным подводом теплоты (определить параметры узловых точек цикла, количество подведенной и отведенной теплоты, полученную работу и термический коэффициент полезного действия цикла), если дано:  $p_1=0,1$  МПа,  $t_1=17$  °С,  $\varepsilon=4$ ,  $\lambda=p_3/p_2=3,5$ . Рабочее тело обладает свойствами воздуха. Принять  $c_{vm}=0,72$  кДж/(кг·К) и  $k=1,4$ .

**Дано:**  
 $p_1 := 0,1$  МПа  
 $T_1 := 17$  °С = 290,15 К  
 $\varepsilon := 4$   
 $\lambda := 3,5$   
 $c_{vm} := 0,72$   $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$   
 $k := 1,4$

?

**Решение:**

**Определяем параметры узловых точек цикла.**

**Точка 1.**

$$v_1 := \frac{R \cdot T_1}{p_1} = 0,8329 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

**Точка 2.**

$$v_2 := \frac{v_1}{\varepsilon} = 0,2082 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

$$T_2 := T_1 \cdot \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} = 505,18 \text{ К}$$

$$p_2 := \frac{R \cdot T_2}{v_2} = 0,6964 \text{ МПа}$$

**Точка 3.**

$$p_3 := p_2 \cdot \lambda = 2,4375 \text{ МПа}$$

$$T_3 := T_2 \cdot \lambda = 1768,13 \text{ К}$$

**Точка 4.**

$$v_4 := v_1 = 0,8329 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

$$T_4 := T_3 \cdot \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^{k-1} = 1015,52 \text{ К}$$

$$p_4 := p_1 \cdot \left( \frac{T_4}{T_1} \right) = 0,35 \text{ МПа}$$

**Теплота, подведенная к рабочему телу:**

$$q_1 := c_{vm} \cdot (T_3 - T_2) = 909,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

**Теплота, отведенная от рабочего тела:**

$$|q_2| := c_{vm} \cdot (T_4 - T_1) = 522,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

**работа цикла**

$$l_{ц} := \frac{R}{k-1} \cdot (T_1 - T_2) + \frac{R}{k-1} \cdot (T_3 - T_4) = 385,8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

**термический КПД**

$$\eta_t := \frac{l_{ц}}{q_1} = 0,424$$

7.2. Определить термический КПД цикла двигателя внутреннего сгорания с изохорным подводом теплоты, если известны  $t_1=20\text{ }^\circ\text{C}$  и  $t_2=217\text{ }^\circ\text{C}$ .

**Ответ:**  $\eta_t=40,2\%$ .

7.3 Вычислить наивысшее давление и температуру рабочего тела в цикле двигателя внутреннего сгорания с изохорным подводом теплоты, если известны  $p_1=0,095\text{ МПа}$ ,  $t_1=7\text{ }^\circ\text{C}$  и  $\varepsilon=6$ . Количество подведенной теплоты  $q_1=800\text{ кДж/кг}$ . Рабочее тело обладает свойствами воздуха.

**Ответ:**  $T_3=1680\text{ К}$ ,  $p_3=1,17\text{ МПа}$ .

7.4 Для цикла двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при  $v=const$  определить параметры узловых точек цикла, количество подведенной и отведенной теплоты, работу цикла и термический коэффициент полезного действия, если дано:  $p_1=0,1\text{ МПа}$ ,  $t_1=30\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\varepsilon=7$ . Степень давления  $\lambda=2$ . Рабочее тело – воздух. Теплоемкость в процессах подвода и отвода теплоты принять не зависящей от температуры.

**Ответ:**  $v_1=0,87\text{ м}^3/\text{кг}$ ,  $v_2=0,124\text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $p_2=1,52\text{ МПа}$ ,  
 $p_3=3,05\text{ МПа}$ ,  $p_4=0,2\text{ МПа}$ ;  $T_2=660\text{ К}$ ,  $T_3=1320\text{ К}$ ,  $T_4=606\text{ К}$ ;  
 $q_1=477\text{ кДж/кг}$ ,  $|q_2|=219\text{ кДж/кг}$ ;  $l_{ц}=256\text{ кДж/кг}$ ;  $\eta_t=53,7\%$ .

7.5 Как изменится термический КПД двигателя внутреннего сгорания с изохорным подводом теплоты к рабочему телу, если степень сжатия  $\varepsilon$  увеличится от 6 до 12. Принять  $k=1,37$ .

**Ответ:**  $\eta_{t1}=48,5\%$ ,  $\eta_{t2}=60,1\%$ .

7.6. Определить потерю работоспособности в цикле двигателя внутреннего сгорания с изохорным подводом теплоты, обусловленную неполным расширением продуктов сгорания (т.е. расширением не до атмосферного давления). Принять температуры в начале сжатия горючей смеси  $t_1=20\text{ }^\circ\text{C}$ , а в конце  $t_2=250\text{ }^\circ\text{C}$ . В конце изохорного горения  $t_3=1300\text{ }^\circ\text{C}$ . Давление в начале сжатия 1 бар.

**Ответ:**  $\Delta l=0,171\text{ МДж/кг}$ .

7.7. Температура горючей смеси, поступающей в двигатель Отто, составляет  $30\text{ }^\circ\text{C}$ . При горении предварительно сжатой смеси в цилиндре двигателя выделяется  $900\text{ кДж/кг}$  теплоты, и температура газа достигает  $1500\text{ }^\circ\text{C}$ . Определить термический КПД цикла, считая, что рабочее вещество обладает свойствами воздуха.

**Ответ:**  $\eta_t=0,426$ .

7.8. Температура и расход рабочей смеси, поступающей в двигатель с изохорным подводом теплоты, соответственно составляют  $25\text{ }^\circ\text{C}$  и  $60\text{ кг/с}$ . Определить мощность мотора и термический КПД, если известно, что в течение рабочего хода температура газов понижается от  $700$  до  $350\text{ }^\circ\text{C}$ . Считать, что рабочее вещество обладает свойствами воздуха.

**Ответ:**  $N=7,92\text{ МВт}$ ,  $\eta_t=36\%$ .

7.9. Найти параметры узловых точек, количество подведенной и отведенной теплоты, полезную работу, термический КПД цикла двигателя внутреннего

сгорания и изобарным подводом теплоты, если дано:  $p_1=0,1$  МПа,  $t_1=17$  °С,  $\varepsilon=14$  и  $\rho=1,8$ . Рабочее тело обладает свойствами воздуха. Принять  $k=1,4$ .

**Дано:**

$$p_1 := 0,1 \text{ МПа}$$

$$T_1 := 17 \text{ °С} = 290,15 \text{ К}$$

$$\varepsilon := 14$$

$$\rho := 1,8$$

$$k := 1,4$$

?

**Решение:**

Определяем параметры узловых точек цикла.

Точка 1.

$$v_1 := \frac{R \cdot T_1}{p_1} = 0,8329 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

Точка 2.

$$v_2 := \frac{v_1}{\varepsilon} = 0,0595 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

$$T_2 := T_1 \cdot \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} = 833,82 \text{ К}$$

$$p_2 := \frac{R \cdot T_2}{v_2} = 4,023 \text{ МПа}$$

Точка 3.

$$v_3 := v_2 \cdot \rho = 0,1071 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

$$T_3 := T_2 \cdot \rho = 1500,88 \text{ К}$$

$$p_3 := p_2 = 4,02 \text{ МПа}$$

Точка 4.

$$v_4 := v_1 = 0,8329 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

$$p_4 := \frac{p_3}{\left( \frac{v_1}{v_3} \right)^k} = 0,2277 \text{ МПа}$$

$$T_4 := T_1 \cdot \left( \frac{p_4}{p_1} \right) = 660,7 \text{ К}$$

средняя изобарная теплоемкость в процессе 2-3

$$c_{pm23} := \text{CoolProp_Props} \left( \text{"CPMASS"; "P"; } \frac{p_2 + p_3}{2}; \text{"T"; } \frac{T_2 + T_3}{2}; \text{"R729"} \right) = 1,172 \frac{\text{кДж}}{\text{кг К}}$$

средняя изохорная теплоемкость в процессе 4-1

$$c_{vm41} := \text{CoolProp_Props} \left( \text{"CVMASS"; "P"; } \frac{p_4 + p_1}{2}; \text{"T"; } \frac{T_4 + T_1}{2}; \text{"R729"} \right) = 0,7379 \frac{\text{кДж}}{\text{кг К}}$$

Теплота, подведенная к рабочему телу:

$$q_1 := c_{pm23} \cdot (T_3 - T_2) = 781,8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Теплота, отведенная от рабочего тела:

$$|q_2| := c_{vm41} \cdot (T_4 - T_1) = 273,4 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

работа цикла

$$l_{ц} := q_1 - |q_2| = 508,4 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

термический КПД

$$\eta_t := \frac{l_{ц}}{q_1} = 0,65$$

**7.10.** Рассчитать цикл двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при постоянном давлении (определить параметры узловых точек, количество подведенной и отведенной теплоты, работу цикла, термический коэффициент полезного действия), если дано:  $p_1=100$  кПа,  $t_1=40$  °С,  $\varepsilon=12$ ,  $k=1,4$ ,  $\rho=1,6$ . Рабочее тело – воздух. Теплоемкость считать постоянной.

**Ответ:**  $v_1=0,896$  м<sup>3</sup>/кг,  $v_2=0,075$  м<sup>3</sup>/кг,  $v_3=0,12$  м<sup>3</sup>/кг,  $v_4=0,9$  м<sup>3</sup>/кг;  $p_2=p_3=3,24$  МПа,  $p_4=0,193$  МПа;  $T_2=846$  К,  $T_3=1353$  К,  $T_4=604$  К;  $q_1=513$  кДж/кг,  $|q_2|=240$  кДж/кг;  $l_{ц}=273$  кДж/кг;  $\eta_t=53,2\%$ .

**7.11.** Определить термический КПД цикла двигателя внутреннего сгорания с изобарным подводом теплоты, если известны температуры в узловых точках ( $t_1=40$  °С,  $t_2=600$  °С,  $t_4=270$  °С), а также термический КПД цикла Карно, осуществленного в том же интервале предельных температур. Принять  $k=1,4$ .

**Ответ:**  $\eta_t=61,5\%$ ,  $\eta_{tc}=75,8\%$ .

**7.12.** Температура воспламенения топлива в цикле двигателя внутреннего сгорания с изобарным подводом теплоты равна 787 °С. Найти минимально необходимое значение степени сжатия, если начальная температура воздуха 50 °С. Сжатие считать адиабатным. Принять  $k=1,4$ .

**Ответ:**  $\varepsilon=19,5$ .

**7.13.** Определить, как изменится термический КПД двигателя внутреннего сгорания с изобарным подводом теплоты к рабочему телу, если степень сжатия увеличивается от 13 до 18 при степени предварительного расширения  $\rho=3$ . Принять  $k=1,4$ .

**Ответ:**  $\eta_{t1}=53,2\%$ ,  $\eta_{t2}=58,9\%$ .

**7.14.** Воздух из атмосферы поступает в мотор Дизеля с температурой 20 °С, сжимается, после чего к воздуху подводится теплота 700 кДж/кг и температура его становится равной 1200 °С. Определить термический КПД цикла.

**Ответ:**  $\eta_t=60,8\%$ .

**7.15.** Отработанные газы начинают покидать цилиндр двигателя Дизеля с температурой 280 °С, вместе с ними отводится теплота 190 кДж/кг.

Определить термический КПД цикла, если степень сжатия равна 15, а рабочее тело обладает свойствами воздуха.

**Ответ:**  $\eta_t = 62,3\%$ .

**7.16.** Как изменится мощность и термический КПД двигателя Дизеля, если увеличить в 1,5 раза: а) степень сжатия, б) степень предварительного расширения, в) начальное давление  $p_1$  в цилиндре (за счет наддува)? Дать изображение в координатах  $p-v$  и  $T-s$  исходного цикла ( $\epsilon = 14$ ;  $\rho = 1,5$ ;  $p_1 = 0,1$  МПа;  $t_1 = 17^\circ\text{C}$ ) и циклов с указанными выше изменениями.

**Ответ:** Исходный цикл:  $N = 62,3$  кВт;  $\eta_t = 62\%$ ; а)  $N = 80$  кВт;  $\eta_t = 67,7\%$ ; б)  $N = 145,7$  кВт;  $\eta_t = 58\%$ ; в)  $N = 93,6$  кВт;  $\eta_t = 62\%$ .

**7.17.** Для цикла газотурбинной установки с подводом теплоты при  $p = \text{const}$  найти параметры узловых точек цикла, полезную работу, термический КПД, количество подведенной и отведенной теплоты, если дано:  $p_1 = 100$  кПа,  $t_1 = 37^\circ\text{C}$ ,  $t_3 = 650^\circ\text{C}$ ,  $\lambda = p_2/p_1 = 9$ . Рабочее тело обладает свойствами воздуха. Принять  $k = 1,4$

**Дано:**

$$p_1 := 0,1 \text{ МПа}$$

$$T_1 := 37^\circ\text{C} = 310,15 \text{ К}$$

$$T_3 := 650^\circ\text{C} = 923,15 \text{ К}$$

$$\lambda := 9$$

$$k := 1,4$$

?

**Точка 2.**

$$T_2 := T_1 \cdot (\lambda)^{\frac{k-1}{k}} = 581,05 \text{ К}$$

$$p_2 := p_1 \cdot \lambda = 0,9 \text{ МПа}$$

$$v_2 := \frac{R \cdot T_2}{p_2} = 0,1853 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

**Точка 3.**

$$p_3 := p_2 = 0,9 \text{ МПа}$$

$$v_3 := v_2 \cdot \frac{T_3}{T_2} = 0,2944 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

**Точка 4.**

$$T_4 := T_1 \cdot \left( \frac{T_3}{T_2} \right) = 492,76 \text{ К}$$

$$v_4 := v_1 \cdot \left( \frac{T_4}{T_1} \right) = 1,41 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

$$p_4 := p_1 = 0,1 \text{ МПа}$$

**Решение:**

**Точка 1.**

$$v_1 := \frac{R \cdot T_1}{p_1} = 0,8903 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

средняя изобарная теплоемкость в процессе 2-3

$$c_{pm23} := \text{CoolProp_Props} \left( \text{"CPMASS"}; \text{"P"}; \frac{p_2 + p_3}{2}; \text{"T"}; \frac{T_2 + T_3}{2}; \text{"R729"} \right) = 1,0889 \frac{\text{кДж}}{\text{кг К}}$$

средняя изохорная теплоемкость в процессе 4-1

$$c_{pm41} := \text{CoolProp_Props} \left( \text{"CPMASS"}; \text{"P"}; \frac{p_4 + p_1}{2}; \text{"T"}; \frac{T_4 + T_1}{2}; \text{"R729"} \right) = 1,0143 \frac{\text{кДж}}{\text{кг К}}$$

Теплота, подведенная к рабочему телу:

$$q_1 := c_{pm23} \cdot (T_3 - T_2) = 372,5 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Теплота, отведенная от рабочего тела:

$$|q_2| := c_{pm41} \cdot (T_4 - T_1) = 185,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

работа цикла

$$l_{ц} := q_1 - |q_2| = 187,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

термический КПД

$$\eta_t := \frac{l_{ц}}{q_1} = 0,503$$

**7.18.** Сжатие воздуха в газотурбинной установке осуществляется осевым компрессором по политропе с показателем  $n=1,5$ . Степень повышения давления  $\lambda=6$ . В компрессор поступает воздух с давлением 0,09 МПа и температурой  $-10^\circ\text{C}$ . В камере сгорания температура воздуха повышается до  $950^\circ\text{C}$ . Расширение газа в турбине происходит по политропе с показателем 1,3. Определить работу компрессора, работу турбины и работу цикла, а также термический КПД цикла. Цикл с подводом теплоты при  $p=const$ . Осуществляется полная регенерация.

**Дано:**

$$n_1 := 1,5$$

$$p_1 := 0,09 \text{ МПа}$$

$$T_1 := (-10)^\circ\text{C} = 263,15 \text{ К}$$

$$T_3 := 950^\circ\text{C} = 1223,15 \text{ К}$$

$$\lambda := 6$$

$$n_2 := 1,3$$

?

**Решение:**

температура в точке 2

$$T_2 := T_1 \cdot (\lambda)^{\frac{n_1 - 1}{n_1}} = 478,18 \text{ К}$$

работа компрессора

$$l_{к} := \frac{n_1 \cdot R}{(n_1 - 1)} \cdot (T_1 - T_2) = -185,17 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

температура в точке 4

$$T_4 := \frac{T_3}{\frac{n_2 - 1}{n_2} \lambda} = 808,92 \text{ К}$$

работа турбины

$$l_T := \frac{n_2 \cdot R}{(n_2 - 1)} \cdot (T_3 - T_4) = 515,25 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

работа цикла

$$l_{\text{ц}} := l_T - |l_K| = 330,1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

термический КПД

$$\eta_t := 1 - \frac{T_1}{T_4} = 0,675$$

**7.19.** В цикле газотурбинной установки с изобарным подводом теплоты параметры рабочего тела:  $t_1=60 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $p_2=0,3 \text{ МПа}$  и  $t_2=320 \text{ }^\circ\text{C}$ . Определить термический КПД цикла.

**Ответ:**  $\eta_t=43,9\%$ .

**7.20.** Газотурбинная установка работает с подводом теплоты при  $p=\text{const}$ . Параметры рабочего тела:  $t_1=27 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $t_4=477 \text{ }^\circ\text{C}$ . Степень повышения давления  $\lambda=7$ . Рабочее тело обладает свойствами воздуха. Как изменится термический КПД при введении полной регенерации?

**Ответ:**  $\eta_t=43\%$ ;  $\eta_t^p=60\%$ .

**7.21.** Газотурбинная установка работает с подводом теплоты при  $v=\text{const}$  и полной регенерацией. Известны параметры:  $t_1=17 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_4=477 \text{ }^\circ\text{C}$  и степень повышения давления  $\lambda=p_2/p_1=5$ . Рабочее тело обладает свойствами воздуха. Определить термический КПД этого цикла.

**Дано:**

$$t_1=17 \text{ }^\circ\text{C}$$

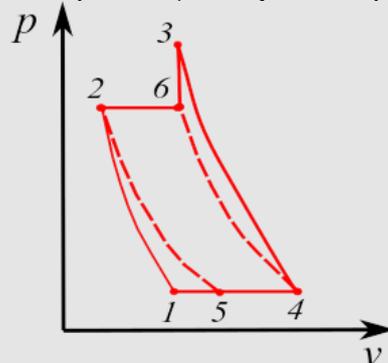
$$t_4=477 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\lambda=p_2/p_1=5$$

?

**Решение:**

Изобразим цикл в  $p-v$  - координатах



Определим термический КПД цикла с полной регенерацией

$$\eta_t^p = 1 - \frac{kT_1 \left( \lambda^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right)}{T_4 \left( \lambda^{k-1} - 1 \right)} = 1 - \frac{1,4 \cdot 290 \cdot \left( 5^{\frac{1,4-1}{1,4}} - 1 \right)}{750 \cdot \left( 5^{(1,4-1)} - 1 \right)} = 0,649$$

**Ответ:**  $\eta_t^p = 0,649$ .

**7.22.** В схеме воздушной холодильной машины циркулирует воздух в количестве 0,3 кг/с. Температура воздуха, поступающего в компрессор -13 °С, а давление 0,09 МПа. Давление после компрессора 0,54 МПа. При прохождении через теплообменник, где воздух охлаждается водой, температура воздуха понижается на 110 °С. Определить холодопроизводительность машины  $Q_0$ .

**Ответ:**  $Q_0 = 19,9$  кВт.

**7.23.** Холодопроизводительность воздушной холодильной машины 10 кВт, холодильный коэффициент цикла  $\varepsilon = 2,15$ . После компрессора воздух охлаждается в теплообменнике, и температура понижается на 90 °С (средняя теплоемкость воздуха в этом процессе  $c_{pm} = 1,006$  кДж/(кг·К)). Определить массовый расход воздуха в схеме холодильной машины.

**Ответ:**  $M = 0,162$  кг/с.

**7.24.** Температура воздуха, поступающего в компрессор воздушной холодильной машины -10 °С, а поступающего в детандер 10 °С. Цикл осуществляется при давлениях 100-500 кПа. Определить, сколько воздуха должно циркулировать в схеме машины, чтобы обеспечить холодопроизводительность, равную 50 кВт, а также теоретическую мощность двигателя компрессора и холодильный коэффициент.

**Ответ:**  $M = 0,585$  кг/с;  $N_k = 29$  кВт;  $\varepsilon = 1,72$ .

**7.25.** Воздушная холодильная машина должна поддерживать температуру в охлаждаемом помещении 0 °С. Температура окружающей среды 17 °С. Машина работает при давлениях воздуха 0,1-0,4 МПа. Холодопроизводительность машины 200 кВт. Определить мощность двигателя компрессора и детандера, расход воздуха, а также холодильный коэффициент цикла, полагая, что воздух перед компрессором нагревается до температуры охлаждаемого помещения, а перед детандером охлаждается до температуры окружающей среды. Вычислить холодильный коэффициент в цикле Карно, осуществляемом в том же интервале температур.

**Дано:**

$$T_1 := (0) \text{ } ^\circ\text{C} = 273,15 \text{ K}$$

$$T_3 := 17 \text{ } ^\circ\text{C} = 290,15 \text{ K}$$

$$P_1 := 0,1 \text{ МПа}$$

$$P_2 := 0,4 \text{ МПа}$$

$$Q_0 := 200 \text{ кВт}$$

$$k := 1,4$$

**Решение:**

$$P_3 := P_2$$

$$P_4 := P_1$$

температура в точке 2

$$T_2 := T_1 \cdot \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 405,9 \text{ K}$$

?

температура в точке 4

$$T_4 := T_3 \cdot \left( \frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 195,26 \text{ К}$$

средняя изобарная теплоемкость в процессе 2-3

$$c_{pm14} := \text{CoolProp_Props} \left( \text{"CPMASS"}; \text{"P"}; \frac{p_1 + p_4}{2}; \text{"T"}; \frac{T_1 + T_4}{2}; \text{"R729"} \right) = 1,0057 \frac{\text{кДж}}{\text{кг К}}$$

массовый расход воздуха

$$M := \frac{Q_0}{c_{pm14} \cdot (T_1 - T_4)} = 2,55 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

работа компрессора

$$l_k := \frac{k \cdot R}{(k-1)} \cdot (T_1 - T_2) = -133,37 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

мощность двигателя компрессора

$$N_k := |l_k| \cdot M = 340,5 \text{ кВт}$$

работа детандера

$$l_d := \frac{k \cdot R}{(k-1)} \cdot (T_3 - T_4) = 95,34 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

мощность двигателя детандера

$$N_d := l_d \cdot M = 243,4 \text{ кВт}$$

работа цикла

$$l_c := (l_d + l_k) = -38 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

холодильный коэффициент

$$\varepsilon := \frac{Q_0}{|l_c| \cdot M} = 2,06$$

холодильный коэффициент машины, работающей по циклу Карно, для того же интервала температур

$$\varepsilon_c := \frac{T_1}{T_3 - T_1} = 16,07$$

**7.26.** Сколько воды должно циркулировать через охладитель воздуха (см. условие задачи 7.25), если вода при прохождении через теплообменник нагревается на 2 °С?

**Ответ:**  $M_v=9,45 \text{ кг/с}$ .

**7.27.** Температура воздуха, поступающего в детандер и компрессор холодильной машины, соответственно, равны 30 и -40 °С. Определить холодопроизводительность машины и холодильный коэффициент цикла, если расход воздуха составляет 0,2 кг/с, а удельная энтропия его уменьшается в воздухоохладителе на 0,15 кДж/(кг·К).  $c_{pm}=1,0 \text{ кДж/(кг·К)}$ .

**Ответ:**  $Q_0=6,5 \text{ кВт}$ ;  $\varepsilon=1,97$ .

**7.28.** Воздушная холодильная машина работает в интервале давлений от 0,1 до 0,3 МПа, при этом температура газа, поступающего в детандер, составляет 300

К. Как изменится холодильный коэффициент цикла, если при сохранении указанных выше параметров использовать в качестве рабочего вещества вместо воздуха аргон?

**Ответ:**  $\varepsilon_B=2,71$ ,  $\varepsilon_{Ar}=1,78$ .

**7.29.** Определить расход электроэнергии для получения 199 кг льда с помощью воздушной холодильной машины, осуществляющей теоретический цикл. В компрессор машины всасывается воздух, параметры которого следующие:  $p_1=0,095$  МПа и  $t_1=-13$  °С. После компрессора давление воздуха 0,38 МПа. Для получения льда используется вода с температурой 10 °С, производимый лед имеет температуру -2 °С.

**Ответ:** расход электроэнергии составит 10 кВт·ч.

**7.30.** Температура воздуха, который поступает в компрессор воздушной холодильной машины, осуществляющей теоретический цикл, равняется -7 °С, а температура поступающего в детандер 27 °С. Цикл осуществляется при давлениях 0,1-0,35 МПа. Определить холодопроизводительность машины и холодильный коэффициент, если количество циркулирующего воздуха 1 кг/с.

**Ответ:**  $Q_0=56,9$  кВт;  $\varepsilon=2,33$ .

## Глава 8. Циклы паровых машин

Циклы, осуществляемые в современных паросиловых установках, основываются на цикле Ренкина для перегретого пара (рис.7.1) В нем процесс 1-2 представляет собой адиабатное расширение перегретого пара в турбине, 2-3 – конденсацию пара в конденсаторе, 3-4 – адиабатное повышение давления жидкости в насосе, 4-5 – подогрев жидкости до температуры насыщения в экономайзере, 5-6 – кипение жидкости в котле, 6-1 – перегрев пара в пароперегревателе. Узловые точки цикла соответствуют следующим состояниям: точка 1 – перегретый пар высокого давления; точка 2 – влажный пар (обычно  $x_2=0,85\div 0,95$ ) низкого давления; точка 3 – насыщенная жидкость низкого давления; точка 4 – ненасыщенная жидкость высокого давления; точка 5 – насыщенная жидкость высокого давления; точка 6 – сухой насыщенный пар высокого давления.

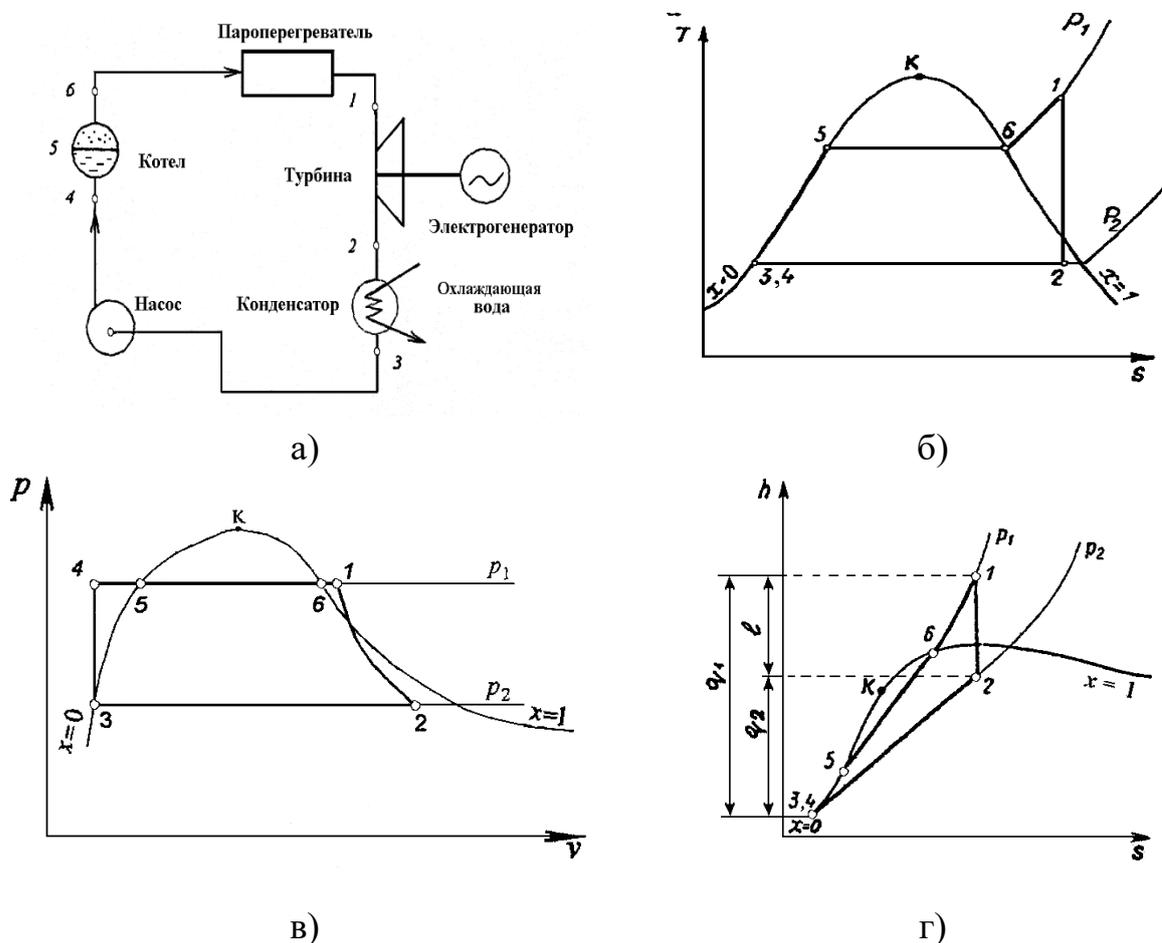


Рис 8.1. Изображение схемы установки (а) и цикла Ренкина для перегретого пара в диаграммах  $T-s$  (б),  $p-v$  (в),  $h-s$  (г)

Тепловой баланс цикла записывается в виде

$$q_1 = l_{\text{и}} + |q_2|, \quad (8.1)$$

где  $q_1 = h_1 - h_4$  - теплота, подведенная к рабочему телу в экономайзере, котле, пароперегревателе;  $|q_2| = h_2 - h_1$  - теплота, отданная рабочим телом в конденсаторе;  $l_{\text{ц}}$  - работа цикла, которую можно с очень небольшой погрешностью принять равной полезной работе турбины; тогда  $l_{\text{ц}} = h_1 - h_2$ .

Термический КПД цикла Ренкина равен

$$\eta_t = \frac{l_{\text{ц}}}{q_1} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_4}. \quad (8.2)$$

Удельный расход пара

$$d_0 = \frac{3600}{h_1 - h_2}. \quad (8.3)$$

В современных компрессионных паровых холодильных машинах обычно осуществляется цикл с дросселированием рабочего тела, с перегревом пара перед компрессором и переохлаждением жидкости перед регулирующим вентилем (рис. 8.2). В этом цикле процесс 1-2 представляет собой адиабатное сжатие пара в компрессоре; 2-3 – сбив перегрева в конденсаторе; 3-4 – конденсацию; 4-5 – переохлаждение жидкости в конденсаторе либо в специальном теплообменнике; 5-6 – дросселирование рабочего тела в регулирующем вентиле; 6-7 – кипение жидкости в испарителе при подводе теплоты, отнимаемой от тел, подлежащих охлаждению; 7-1 – перегрев пар, который часто происходит в испарителе, поэтому теплоту, воспринимаемую рабочим телом в этом процессе, можно включить в удельную холодопроизводительность цикла. Узловые точки цикла соответствуют следующим состояниям: точка 1 – перегретый пар низкого давления; точка 2 – перегретый пар высокого давления; точка 3 – сухой насыщенный пар высокого давления; точка 4 – насыщенная жидкость; точка 5 – ненасыщенная жидкость высокого давления; точка 6 – влажный пар (обычно  $x_6 = 0,1 \div 0,25$ ) низкого давления; точка 7 – сухой насыщенный пар низкого давления.

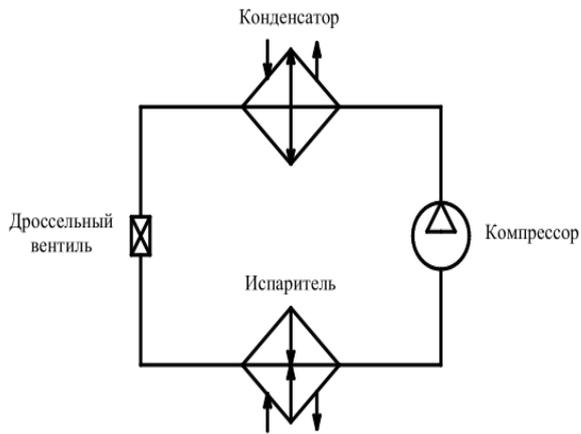
Тепловой баланс записывается в виде

$$|q_1| = q_2 + |l_{\text{ц}}|, \quad (8.4)$$

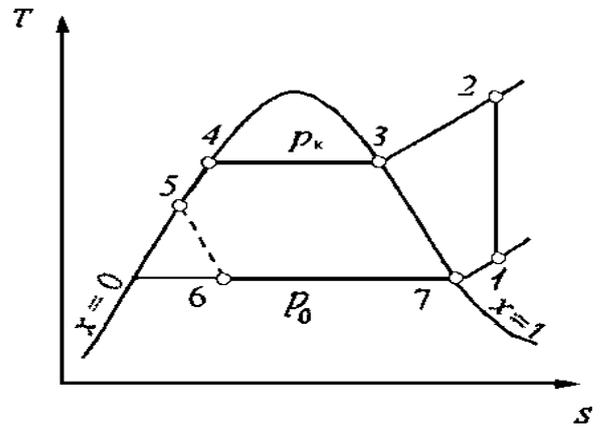
где  $|q_1| = h_2 - h_5$  - теплота, отведенная от рабочего тела в процессах сбива перегрева, конденсации и переохлаждения;  $q_2 = h_1 - h_6$  - теплота, подведенная к рабочему телу в испарителе; в холодильной технике теплота  $q_2$  называется удельной холодопроизводительностью и обозначается  $q_0$ ;  $|l_{\text{ц}}| = h_2 - h_1$  - работа цикла, равная работе компрессора.

## Холодильный коэффициент цикла

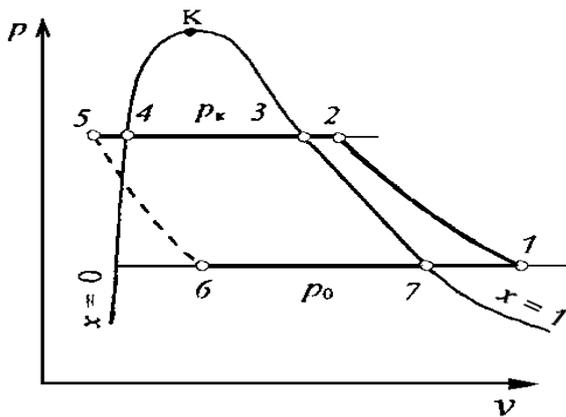
$$\varepsilon = \frac{q_2}{|l_{ц}|} = \frac{h_1 - h_6}{h_2 - h_1} \quad (8.5)$$



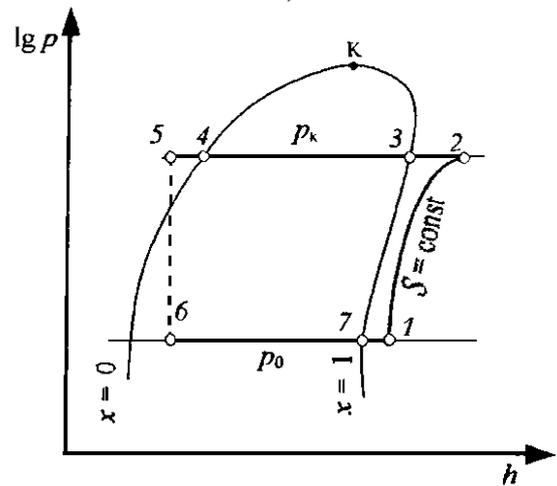
а)



б)



в)



г)

Рис. 8.2. Изображение схемы (а) и цикла паровой холодильной машины в диаграммах  $T-s$  (б),  $p-v$  (в),  $\lg p-h$  (г)

## Задачи

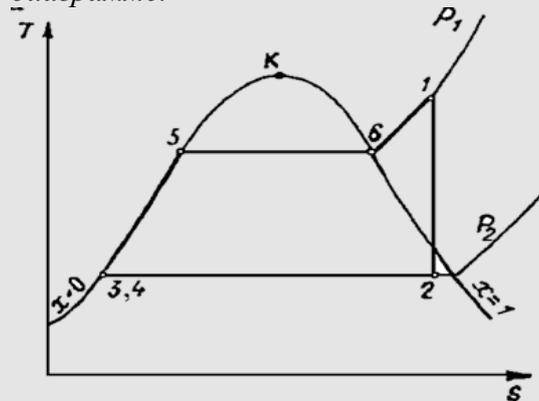
**8.1.** Определить параметры узловых точек цикла Ренкина, количество подведенной и отведенной теплоты, работу цикла, теоретическую мощность турбины, термический КПД, если давление в котле  $p_1=10$  МПа, температура пара перед турбиной  $t_1=500$  °С, давление конденсации  $p_2=0,006$  МПа, расход пара 1200 т/ч. Параметры узловых точек определить двумя способами: а) с помощью диаграммы; б) с помощью таблиц.

**Дано:**

$p_1=10$  МПа  
 $t_1=500$  °С  
 $p_2=0,006$  МПа  
 $M=1200$  т/ч

**Решение:**

Параметры узловых точек цикла (рис. 1) определяем с помощью  $T-s$  – диаграммы водяного пар, для чего строим цикл в диаграмме.



Состояние перегретого пара, входящего в турбину (точка 1), определится в месте пересечения изобары  $p_1=10$  МПа и изотермы  $t_1=500$  °С;

Остальные параметры этой точки:

$v_1=0,033$  м<sup>3</sup>/кг  
 $h_1=3370$  кДж/кг  
 $s_1=6,6$  кДж/(кг К)

Т.к. процесс 1-2 адиабатный, положение точки 2 находим в месте пересечения изоэнтропы  $s_2=s_1$  и изобары  $p_2=0,006$  МПа;

$t_2=36$  °С  
 $v_2=18,5$  м<sup>3</sup>/кг  
 $h_2=2030$  кДж/кг  
 $s_2=6,6$  кДж/(кг К)  
 $x_2=0,78$

Точка 3 лежит на пересечении изобары  $p_2$  с нижней пограничной кривой:

$t_3=36$  °С  
 $v_3=0,001$  м<sup>3</sup>/кг  
 $h_3=152$  кДж/кг  
 $s_3=0,52$  кДж/(кг К)  
 $x_3=0$

Положение точки 4 практически совпадает с положением точки 3 в  $T-s$  – диаграмме, поэтому параметры ее такие же, как и для точки 3, кроме величины давления

$p_4=10$  МПа  
 $t_4=36$  °С  
 $v_4=0,001$  м<sup>3</sup>/кг  
 $h_4=152$  кДж/кг

$$s_4=0,52 \text{ кДж/(кг К)}$$

Точка 5 лежит на пересечении изобары  $p_1=10$  МПа с нижней пограничной кривой:

$$t_5=310 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$v_5=0,001 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$h_5=1410 \text{ кДж/кг}$$

$$s_5=3,4 \text{ кДж/(кг К)}$$

$$x_5=0$$

Точка 6 лежит на пересечении изобары  $p_1=10$  МПа с верхней пограничной кривой:

$$t_6=310 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$v_6=0,018 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$h_6=2720 \text{ кДж/кг}$$

$$s_6=5,6 \text{ кДж/(кг К)}$$

$$x_6=1$$

Параметры цикла определяем по таблицам.

Параметры точки 1 находим в таблицах перегретых паров по давлению  $p_1=10$  МПа и температуре перегрева  $t_1=500$  °C:

$$v_1=0,0328 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$h_1=3372 \text{ кДж/кг}$$

$$s_1=6,596 \text{ кДж/(кг К)}$$

Параметры точки 2 (влажный насыщенный пар) определяем расчетом, используя необходимые данные таблиц насыщенных паров

$$p_2=0,006 \text{ МПа и } s_2=s_1=6,596 \text{ кДж/(кг К)}$$

$$x_2 = \frac{T(s_2 - s_3)}{r} = \frac{309,31(6,596 - 0,5207)}{2415} = 0,778$$

$$h_2 = h' + rx_2 = 151,5 + 2415 \cdot 0,778 = 2030,4 \text{ кДж/кг}$$

$$v_2 = v'(1 - x_2) + v''x_2 = 0,001 \cdot 0,222 + 23,74 \cdot 0,778 = 18,47 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Параметры точки 3 (насыщенная жидкость) определяем по таблицам насыщенных паров (индекс ')

по давлению  $p_2=0,006$  МПа

$$t_3=36,18 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$v_3=0,001006 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$h_3=151,5 \text{ кДж/кг}$$

$$s_3=0,5207 \text{ кДж/(кг К)}$$

$$x_3=0$$

Параметры точки 4 (ненасыщенная жидкость) определяем по таблицам «Вода и перегретый пар», считая процесс 3-4 изотермическим, следовательно,

$$p_1=10 \text{ МПа; } t_4= t_3=36,18 \text{ }^\circ\text{C;}$$

$$v_4=0,001002 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$h_4=160,9 \text{ кДж/кг}$$

$$s_4=0,5152 \text{ кДж/(кг К)}$$

Параметры точки 5 (насыщенная жидкость) определяем по таблицам насыщенных паров по давлению

$p_1=10$  МПа (индекс '):

$$t_5=310,96 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$v_5=0,001452 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$h_5=1407,7 \text{ кДж/кг}$$

$$s_5 = 3,36 \text{ кДж/(кг К)}$$

$$x_5 = 0$$

Параметры точки 6 (сухой насыщенный пар) определяем по таблицам насыщенных паров по давлению

$$p_1 = 10 \text{ МПа (индекс "1")}:$$

$$t_6 = 310,96 \text{ °C}$$

$$v_6 = 0,01803 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$h_6 = 2725,0 \text{ кДж/кг}$$

$$s_6 = 5,615 \text{ кДж/(кг К)}$$

$$x_6 = 1$$

Параметры узловых точек удобнее представить в таблице

Номер точки	Параметры воды и водяного пара					
	В цикле	$p$ , МПа	$t$ , °C	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)
1	10,0	500	0,033	3370	6,6	—
			0,0328	3372	6,596	
2	0,006	36	18,5	2030	6,6	0,78
		36,18	18,47	2030,4	6,596	0,778
3	0,006	36	0,001	152	0,52	0
		36,18	0,001006	151,5	0,5207	
4	10,0	36	0,001	152	0,52	—
		36,18	0,001002	160,9	0,5152	
5	10,0	310	0,001	1410	3,4	0
		310,96	0,001452	1407,7	3,36	
6	10,0	310	0,018	2720	5,6	1
		310,96	0,01803	2725	5,615	

**Примечание.** В числителе приводятся значения параметров, найденные с помощью диаграмм, а в знаменателе – таблиц.

Количество подведенной теплоты:

$$q_1 = h_1 - h_4 = 3372 - 160,9 = 3211,1 \text{ кДж/кг}$$

$$M = \frac{12 \cdot 10^5}{3600} = 333,3 \text{ кг/с}$$

$$Q_1 = M q_1 = 333,3 \cdot 3211,1 = 1,07 \cdot 10^6 \text{ кВт}$$

Количество отведенной теплоты

$$|q_2| = h_2 - h_3 = 2030,4 - 151,5 = 1878,9 \text{ кДж/кг}$$

$$|Q_2| = M |q_2| = 333,3 \cdot 1878,9 = 6,26 \cdot 10^5 \text{ кВт}$$

Работа цикла

$$l_{\text{ц}} = l_{\text{т}} - |l_{\text{н}}|,$$

где  $l_{\text{т}}$  - работа турбины и  $l_{\text{н}}$  - работа насоса.

$$l_{\text{т}} = h_1 - h_2 = 3372 - 2030,4 = 1341,6 \text{ кДж/кг}$$

$$|l_{\text{н}}| = v'(p_1 - p_2) = 0,001(10 - 0,006) \cdot 10^6 = 9,99 \text{ кДж/кг}$$

$$l_{\text{ц}} = 1341,6 - 9,99 = 1331,6 \text{ кДж/кг}$$

Теоретическая мощность турбины

$$N_{\text{т}} = M l_{\text{т}} = 333,3 \cdot 1341,6 = 447 \text{ МВт}$$

Термический КПД цикла

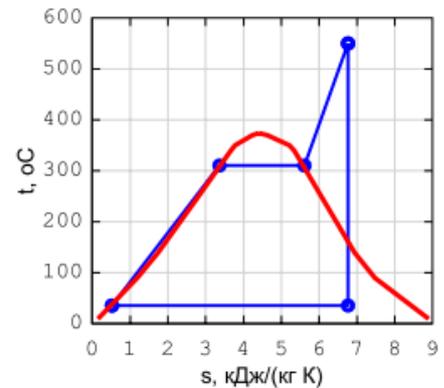
$$\eta_t = \frac{l_{ц}}{q_1} = \frac{1331,6}{3211,1} = 0,415 = 41,5\%$$

Решение задачи с помощью Smatch Studio

Давление в котле, МПа  $P_1 := 10 \text{ МПа}$   
 Температура пара перед турбиной, °C  $t_1 := 550 \text{ }^\circ\text{C}$   
 Давление конденсации, МПа  $P_2 := 0,006 \text{ МПа}$   
 Расход пара, т/ч  $M := 1200 \frac{\text{Т}}{\text{ч}}$   
 $RA := \text{"Water"}$

N	p, МПа	t, °C	v, м3/кг	h, кДж/кг	s, кДж/(кг К)	x
1,000	10,000	550,00	0,035	3502,0	6,758	п.п.
2,000	0,006	36,159	18,960	2080,8	6,758	0,798
3,000	0,006	36,159	0,001	151,48	0,520	н.ж.
4,000	10,000	36,159	0,001	160,40	0,517	нн.ж.
5,000	10,000	311,00	0,001	1408,1	3,360	н.ж.
6,000	10,000	311,00	0,018	2725,5	5,616	с.н.п.

Массовый расход, кг/с  $M := M = 333,3 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$   
 Количество подведенной теплоты, кДж/кг  $q_1 := (h_1 - h_4) \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = 3341,6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$   
 Количество подведенной теплоты, кВт  $Q_1 := M \cdot q_1 = 1113,85 \text{ МВт}$   
 Количество отведенной теплоты, кДж/кг  $|q_2| := (h_2 - h_3) \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = 1929,4 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$   
 Количество отведенной теплоты, кВт  $|Q_2| := M \cdot |q_2| = 643,12 \text{ МВт}$   
 Работа турбины, кДж/кг  $l_T := (h_1 - h_2) \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = 1421,1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$   
 Работа насоса, кДж/кг  $l_N := \left( v_3 \cdot \left( \frac{P_1}{\text{кПа}} - \frac{P_2}{\text{кПа}} \right) \right) \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = 10,1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$   
 Работа цикла, кДж/кг  $l_{ц} := l_T - l_N = 1411,1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$   
 Теоретическая мощность турбины, кВт  $N_T := M \cdot l_T = 473,71 \text{ МВт}$   
 Термический КПД  $\eta_t := \frac{l_{ц}}{q_1} = 0,422$



8.2. В паросиловой установке, работающей по циклу Ренкина, давление в котле и конденсаторе, соответственно 3 и 0,01 МПа. Как изменится термический КПД цикла, если в турбину вместо сухого насыщенного будет поступать перегретый пар с температурой 400 °C?

Ответ:  $\eta_t^c = 32,4\%$ ;  $\eta_t^n = 34,2\%$ .

8.3. Определить термический КПД и мощность паросиловой установки, работающей по циклу Ренкина, если давление в котле и конденсаторе соответственно 5 и 0,04 МПа, температура пара перед турбиной 450 °C, а его расход 100 т/ч.

Ответ:  $\eta_t = 39,5\%$ ;  $N_t = 35,1 \text{ МВт}$ .

**8.4.** В котельной установке, снабжающей турбину паром, сжигается топливо, теплота сгорания которого 25000 кДж/кг. КПД котельной установки 0,8. Определить часовой расход топлива, необходимый для работы паросиловой установки мощностью 100 МВт. Паросиловая установка работает по циклу Ренкина, давление в котле и конденсаторе соответственно 15 и 0,004 МПа. Температура пара, входящего в турбину 500 °С.

<p><b>Дано:</b>  <math>p_1=15</math> МПа  <math>t_1=500</math> °С  <math>p_2=0,004</math> МПа  <math>q=25000</math> кДж/кг  <math>\eta_t = 0,8</math>  <math>N_T=100</math> МВт</p>	<p><b>Решение:</b>  Обозначение узловых точек цикла соответствуют рис. 7.1. С помощью <math>T-s</math> – диаграммы водяного пара определяем параметры:  <math>h_1=3310</math> кДж/кг; <math>h_2=1910</math> кДж/кг; <math>h_3=h_4=121</math> кДж/кг  Работа цикла и теплота, подведенная к рабочему телу  <math>l_{ц} = h_1 - h_2 = 3310 - 1910 = 1400</math> кДж/кг  <math>q_1 = h_1 - h_4 = 3310 - 121 = 3189</math> кДж/кг  Расход пара  <math display="block">M = \frac{N}{l_{ц}} = \frac{100000}{1400} = 71,5</math> кг/с  Количество теплоты, которое необходимо подводить к воде в котельной установке  <math display="block">Q = \frac{Mq_1}{\eta_k} = \frac{71,5 \cdot 3189}{0,8} = 285</math> МВт  Расход топлива  <math display="block">M_T = \frac{Q}{q} = \frac{285}{25} = 11,4</math> кг/с</p>
<p><math>M_T=?</math></p>	

**8.5.** Рассчитать цикл теплофикационной установки (найти параметры узловых точек цикла, количество подведенной и отведенной теплоты, работу цикла, термический КПД), если  $p_1=4$  МПа,  $t_1=420$  °С и  $p_2=0,12$  МПа. Параметры определить с помощью таблиц.

<p><b>Дано:</b>  <math>p_1=4</math> МПа  <math>t_1=420</math> °С  <math>p_2=0,12</math> МПа</p>	<p><b>Решение:</b>  Обозначение узловых точек цикла соответствуют рис. 7.1. Параметры узловых точек цикла представлены в таблице</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Номер точки в цикле</th> <th colspan="6">Параметры воды и водяного пара</th> </tr> <tr> <th><math>p</math>, МПа</th> <th><math>t</math>, °С</th> <th><math>v</math>, м<sup>3</sup>/кг</th> <th><math>h</math>, кДж/кг</th> <th><math>s</math>, кДж/(кг·К)</th> <th><math>x</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>4,0</td> <td>420</td> <td>0,07606</td> <td>3261,4</td> <td>6,8399</td> <td>–</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0,12</td> <td>104,8</td> <td>1,319</td> <td>2511</td> <td>6,8399</td> <td>0,923</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0,12</td> <td>104,8</td> <td>0,001048</td> <td>439,4</td> <td>1,3609</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>4,0</td> <td>104,8</td> <td>0,001046</td> <td>442,2</td> <td>1,3574</td> <td>–</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>4,0</td> <td>250,3</td> <td>0,001252</td> <td>1087,5</td> <td>2,7967</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>4,0</td> <td>250,3</td> <td>0,0497</td> <td>2799,4</td> <td>6,067</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table> <p> <math>q_1 = 2819,2</math> кДж/кг  <math> q_2  = 2071,6</math> кДж/кг  <math>l_{ц} = 750</math> кДж/кг  <math>\eta_t = 26,6\%</math> </p>	Номер точки в цикле	Параметры воды и водяного пара						$p$ , МПа	$t$ , °С	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$x$	1	4,0	420	0,07606	3261,4	6,8399	–	2	0,12	104,8	1,319	2511	6,8399	0,923	3	0,12	104,8	0,001048	439,4	1,3609	0	4	4,0	104,8	0,001046	442,2	1,3574	–	5	4,0	250,3	0,001252	1087,5	2,7967	0	6	4,0	250,3	0,0497	2799,4	6,067	1
Номер точки в цикле	Параметры воды и водяного пара																																																							
	$p$ , МПа	$t$ , °С	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$x$																																																		
1	4,0	420	0,07606	3261,4	6,8399	–																																																		
2	0,12	104,8	1,319	2511	6,8399	0,923																																																		
3	0,12	104,8	0,001048	439,4	1,3609	0																																																		
4	4,0	104,8	0,001046	442,2	1,3574	–																																																		
5	4,0	250,3	0,001252	1087,5	2,7967	0																																																		
6	4,0	250,3	0,0497	2799,4	6,067	1																																																		
<p><math>M?</math></p>																																																								

**8.6.** В турбину поступает пар при давлении 10 МПа и температуре 500 °С. Давление в конденсаторе 0,005 МПа. Определить состояние после турбины, если ее относительный внутренний КПД  $\eta_{oi}=0,85$ . Задачу решить с помощью  $h-s$  – диаграммы.

**Ответ:** влажный пар;  $x=0,855$  МВт.

**8.7.** В паросиловой установке, работающей по циклу Ренкина, в турбину поступает пар ( $p_1=1,7$  МПа и  $t_1=340$  °С). После турбины удельный объем влажного насыщенного пара 35 м<sup>3</sup>/кг. Расход пара 250 кг/ч. Определить параметры узловых точек цикла, количество подведенной и отведенной теплоты, работу цикла, термический КПД, мощность установки. Задачу решить с помощью диаграммы.

**Дано:**

$p_1=1,7$  МПа  
 $t_1=340$  °С  
 $v_2=35$  м<sup>3</sup>/кг  
 $M=250$  кг/ч

?

**Решение:**

Обозначение узловых точек цикла соответствуют рис. 1.

Параметры узловых точек цикла представлены в таблице

Номер точки в цикле	Параметры воды и водяного пара					
	$p$ , МПа	$t$ , °С	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$x$
1	1,7	340	0,160	3120	7,0	–
2	0,0031	25	35	2080	7,0	0,81
3	0,0031	25	0,001	105	0,37	0
4	1,7	25	0,001	105	0,37	–
5	1,7	205	0,001	872	2,4	0
6	1,7	205	0,117	2790	6,4	1

$$Q_1 = 209 \text{ кВт}; \quad |Q_2| = 137 \text{ кВт}$$

$$l_u = 1040 \text{ кДж/кг}$$

$$N_t = 72 \text{ кВт}$$

$$\eta_t = 34,5\%$$

**8.8.** Рассчитать цикл паросиловой установки, если в турбину поступает пар с давлением  $p_1=30$  МПа и  $t_1=600$  °С. Давление в конденсаторе  $p_2=0,005$  МПа. Расход пара 1000 кг/ч. Задачу решить с помощью таблиц.

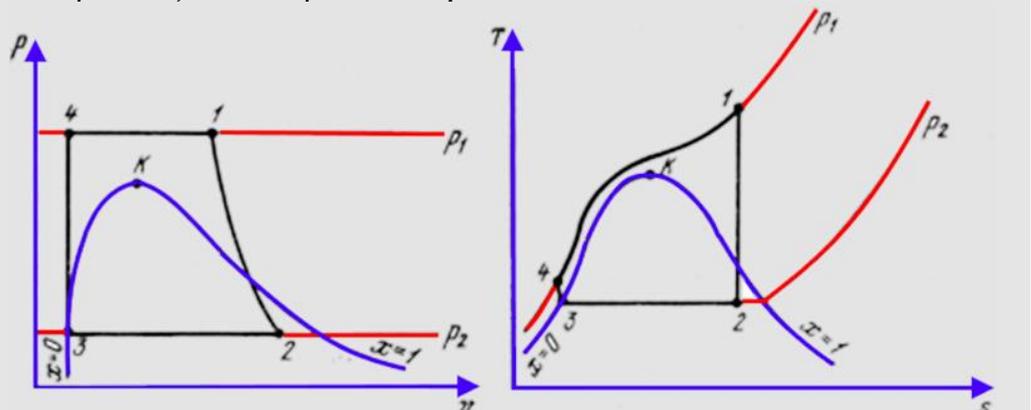
**Дано:**

$p_1=30$  МПа  
 $t_1=600$  °С  
 $p_2=0,005$  МПа  
 $M=1000$  кг/ч

?

**Решение:**

Изобразим цикл в координатах  $p-v$  и  $T-s$



Параметры узловых точек цикла представлены в таблице

Номер точки в цикле	Параметры воды и водяного пара					
	$p$ , МПа	$t$ , °С	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$x$
1	30	600	0,01144	3444,2	6,2351	–
2	0,005	32,9	20,5	1899,6	6,2351	0,727
3	0,005	32,9	0,001005	137,77	0,4762	0
4	30	33,7	0,000928	167,8	0,4762	–

Параметры точки 1 находим в таблицах перегретых паров по давлению  $p_1=30$  МПа и температуре  $t_1=600$  °С:

Параметры точки 2 (влажный насыщенный пар) определяем расчетом, используя необходимые данные таблиц насыщенных паров  $p_2=0,006$  МПа и  $s_2=s_1=6,2351$  кДж/(кг К)

$$x_2 = \frac{T(s_2 - s'_1)}{r} = \frac{306(6,235 - 0,476)}{2423,4} = 0,727$$

$$h_2 = h' + rx_2 = 137,77 + 2423 \cdot 0,727 = 1899,6 \text{ кДж/кг}$$

$$v_2 = v'(1 - x_2) + v''x_2 = 0,001 \cdot 0,273 + 28,196 \cdot 0,727 = 20,5 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Параметры точки 3 определяем по таблицам насыщенных паров по давлению  $p_2=0,005$  МПа

Параметры точки 4 определяем по таблицам «Вода и перегретый пар» по давлению  $p_2=0,005$  МПа и значению энтропии  $s_4=s_3=0,4762$  кДж/(кг К)

Количество подведенной теплоты:

$$q_1 = h_1 - h_4 = 3444,2 - 167,8 = 3276,4 \text{ кДж/кг}$$

$$Q_1 = Mq_1 = 0,278 \cdot 3276,4 = 910 \text{ кВт}$$

Количество отведенной теплоты

$$|q_2| = h_2 - h_3 = 1899,6 - 137,8 = 1761,8 \text{ кДж/кг}$$

$$|Q_2| = M|q_2| = 0,278 \cdot 1761,8 = 489,4 \text{ кВт}$$

Работа цикла

$$l_{ц} = l_T - |l_H|,$$

где  $l_T$  - работа турбины и  $l_H$  - работа насоса.

$$l_T = h_1 - h_2 = 3444,2 - 1899,6 = 1544,6 \text{ кДж/кг}$$

$$|l_H| = h_4 - h_3 = 167,8 - 137,0 = 30 \text{ кДж/кг}$$

$$l_{ц} = 1544,6 - 30 = 1514,6 \text{ кДж/кг}$$

Теоретическая мощность турбины

$$N_T = Ml_T = 0,278 \cdot 1541,6 = 420,7 \text{ кВт}$$

Термический КПД цикла

$$\eta_t = \frac{l_{ц}}{q_1} = \frac{1514,6}{3276,4} = 46,2\%$$

**8.9.** Как изменится термический КПД паросиловой установки (см. условие задачи 8.8), если давление в котле понизится до 24 МПа?

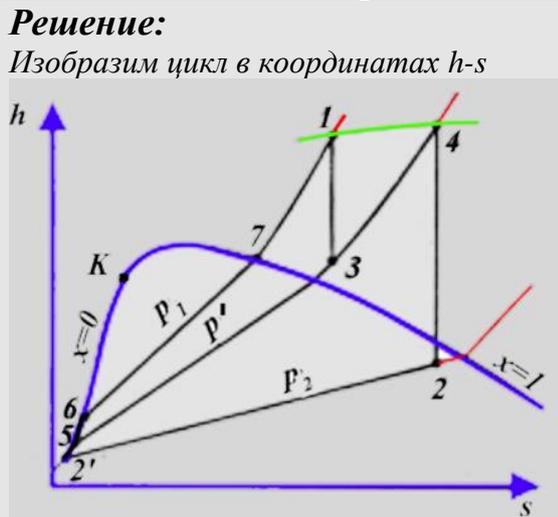
**Ответ:** термический КПД понизится и станет равным 45,8%.

**8.10.** Определить термический КПД паросиловой установки, если давление в котле 24 МПа, температура пара перед турбиной 500 °С, давление в конденсаторе 0,005 МПа.

**Ответ:**  $\eta_t = 44\%$ .

**8.11.** параметры пара в паросиловой установке:  $p_1=15$  МПа,  $t_1=550$  °С,  $p_2=0,005$  МПа. В установке осуществляется вторичный перегрев пара при  $p'=4$  МПа до начальной температуры  $t'=t_1=550$  °С. Определить термический КПД этого цикла. Задачу решить с помощью  $h-s$  – диаграммы.

**Дано:**  
 $p_1=15$  МПа  
 $t_1=550$  °С  
 $p_2=0,005$  МПа  
 $p'=4$  МПа  
 $t'=t_1=550$  °С  
 $M=250$  кг/ч  
 ?



И по ней находим значения параметров:  
 $h_1=3450$  кДж/кг;  $h_3=3050$  кДж/кг;  $h_4=3560$  кДж/кг;  
 $h_2=2200$  кДж/кг;  $h'_2=138$  кДж/кг  
 Работа 1 кг пара в цилиндре высокого давления  
 $l_1 = h_1 - h_3 = 3450 - 3050 = 400$  кДж/кг  
 Работа 1 кг пара в цилиндре низкого давления  
 $l_2 = h_4 - h_2 = 3560 - 2200 = 1360$  кДж/кг  
 Суммарная работа 1 кг пара  
 $l_{\Sigma} = l_1 + l_2 = 400 + 1360 = 1760$  кДж/кг  
 Теплота, подведенная к воде в паровом котле  
 $q'_1 = h_1 - h'_2 = 3450 - 138 = 3312$  кДж/кг  
 Теплота, подведенная при вторичном перегреве  
 $q''_1 = h_4 - h_3 = 3560 - 3050 = 510$  кДж/кг  
 Общее количество теплоты, подведенное в цикле  
 $q_1 = q'_1 + q''_1 = 3312 + 510 = 3822$  кДж/кг  
 Термический КПД цикла  

$$\eta_t = \frac{l_{\Sigma}}{q_1} = \frac{1760}{3822} = 46,1\%$$

**8.12** Для условий задачи 8.11 определить термический КПД установки при отсутствии вторичного перегрева, а также степень сухости пара в конце расширения для циклов со вторичным перегревом и без него.

**Ответ:**  $\eta_t = 44,3\%$ ;  $x=0,703$ ;  $x_{\Pi}=0,852$ .

**8.13.** Рассчитать теоретический цикл паросиловой установки, использующей геотермальную теплоту. В котле установки хладагент R134a кипит при давлении 3 МПа, затем перегревается до температуры 90 °С и направляется в турбину. Образующийся после адиабатного расширения влажный пар конденсируется при температуре 20 °С и затем жидкий R134a подается насосом в котел.

**Дано:**

$p_1=3$  МПа  
 $t_1=90$  °С  
 $t_2=20$  °С

?

**Решение:**

Обозначение узловых точек цикла соответствуют рис. 1.  
 Параметры узловых точек цикла представлены в таблице

Номер точки в цикле	Параметры воды и водяного пара					
	$p$ , МПа	$t$ , °С	$v \cdot 10^3$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$x$
1	3,0	90	5,75	436,1	1,699	–
2	0,572	20	34,8	404,2	1,699	0,9688
3	0,572	20	0,817	227,5	1,096	0
4	3,0	20	0,817	229,5	1,096	–
5	3,0	86,2	1,14	335,2	1,419	0
6	3,0	86,0	5,2	427,0	1,675	1

$$q_1 = 206,6 \text{ кДж/кг}; \quad |q_2| = 176,7 \text{ кДж/кг}$$

$$l_T = 31,9 \text{ кДж/кг}; \quad |l_H| = 1,98 \text{ кДж/кг};$$

$$\eta_t = 14,5\%$$

**8.14.** Паровая холодильная машина работает по обратимому циклу Карно. Рабочее тело – аммиак. Давление в конденсаторе и испарителе соответственно 1,036 и 0,119 МПа. Определить холодильный коэффициент цикла, а также как изменится холодильный коэффициент, если процесс адиабатного расширения аммиака заменить процессом дросселирования.

**Ответ:**  $\varepsilon_c = 4,34$ ;  $\varepsilon = 3,8$ .

**8.15.** Рассчитать цикл паровой холодильной машины (определить параметры узловых точек, количество подведенной и отведенной теплоты, работу цикла, холодильный коэффициент, мощность двигателя компрессора), работающего на R22. Температура кипения -30 °С и конденсации 30 °С. В компрессор поступает перегретый пар температурой -20 °С. Охлаждение жидкости перед регулирующим вентилем отсутствует. Расход хладагента 250 кг/ч. Параметры определить двумя способами: а) с помощью таблиц; б) с помощью диаграммы.

**Дано:**

$t_0 = -30 \text{ }^\circ\text{C}$

$t_k = 30 \text{ }^\circ\text{C}$

$t_1 = -20 \text{ }^\circ\text{C}$

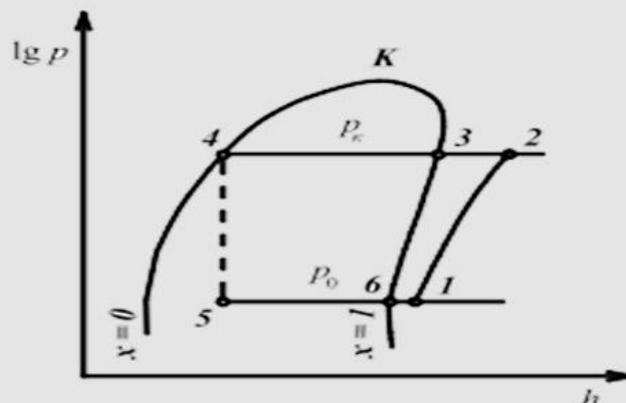
$M = 250 \text{ кг/ч}$

$t, v, h, s - ?$

**Решение:**

Определяем параметры узловых точек цикла с помощью диаграммы.

Для этого вписываем цикл в  $\lg p-h$  – диаграмму



Прежде всего находим на диаграмме положение двух изобар: изобары, соответствующей температуре кипения  $t_0$  и изобары  $p_k$ , соответствующей температуре конденсации. Положение точки 1 (состояние перегретого пара при входе в компрессор) находим в месте пересечения изобары  $p_0$  и изотермы  $t_1 = -20 \text{ }^\circ\text{C}$

$p_0 = 0,17 \text{ МПа}$

$v_1 = 0,14 \text{ м}^3/\text{кг}$

$h_1 = 698 \text{ кДж/кг}$

$s_1 = 1,82 \text{ кДж/(кг К)}$

Положение точки 2 (выход пара из компрессора) находим в месте пересечения изобары  $p_k$  и изоэнтропы  $s_2 = s_1$ ;

$p_k = 1,2 \text{ МПа}$

$s_2 = s_1 = 1,82 \text{ кДж/(кг К)}$

$t_2 = 76 \text{ }^\circ\text{C}$

$v_2 = 0,025 \text{ м}^3/\text{кг}$

$h_2 = 750 \text{ кДж/кг}$

Точка 3 находится на пересечении изотермы  $t_k = 30 \text{ }^\circ\text{C}$  с верхней пограничной кривой

$p_k = 1,2 \text{ МПа}$

$v_3 = 0,02 \text{ м}^3/\text{кг}$

$h_3 = 713 \text{ кДж/кг}$

$s_3 = 1,71 \text{ кДж/(кг К)}$

$x_3 = 1$

Точка 4 лежит на пересечении изотермы  $t_k = 30 \text{ }^\circ\text{C}$  с нижней пограничной кривой

$p_k = 1,2 \text{ МПа}$

$h_4 = 536 \text{ кДж/кг}$

$s_4 = 1,13 \text{ кДж/(кг К)}$

$x_4 = 0$

Точку 5 находим в месте пересечения изоэнthalпии  $h_5 = h_4$  и изотермы  $t_0 = -30 \text{ }^\circ\text{C}$

$p_0 = 0,17 \text{ МПа}$

$h_5 = h_4 = 536 \text{ кДж/кг}$

$v_5 = 0,04 \text{ м}^3/\text{кг}$

$$s_5 = 1,16 \text{ кДж/(кг К)}$$

$$x_5 = 0,31$$

Точка 6 лежит на пересечении изотермы  $t_0 = -30 \text{ }^\circ\text{C}$  с верхней пограничной кривой

$$p_0 = 0,17 \text{ МПа}$$

$$v_6 = 0,13 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$h_6 = 692 \text{ кДж/кг}$$

$$s_6 = 1,8 \text{ кДж/(кг К)}$$

$$x_6 = 1$$

Определяем параметры с помощью таблиц.

В таблицах насыщенных паров R22 определяем

$p_0 = 0,164 \text{ МПа}$  по температуре  $t_0 = -30 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $p_k = 1,191 \text{ МПа}$  – по  $t_k = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Параметры точки 1 находим в таблице перегретого пар по  $p_0 = 0,164 \text{ МПа}$  и  $t_1 = -20 \text{ }^\circ\text{C}$

$$v_1 = 0,1444 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$h_1 = 698,3 \text{ кДж/кг}$$

$$s_1 = 1,8252 \text{ кДж/(кг К)}$$

Параметры точки 2 находим в таблице перегретого пар по  $p_0 = 0,164 \text{ МПа}$  и  $s_2 = s_1 = 1,8252 \text{ кДж/(кг К)}$

$$t_2 = 76,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$v_2 = 0,025 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$h_2 = 750 \text{ кДж/кг}$$

Параметры точек 3 и 4 находим в таблице насыщенного пара по  $t_k = 30 \text{ }^\circ\text{C}$

$$v_3 = 0,0197 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$h_3 = 713,57 \text{ кДж/кг}$$

$$s_3 = 1,7089 \text{ кДж/(кг К)}$$

$$x_3 = 1$$

$$v_3 = 0,000852 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$h_4 = 536,5 \text{ кДж/кг}$$

$$s_4 = 1,1248 \text{ кДж/(кг К)}$$

$$x_4 = 0$$

Параметры точки 5 рассчитываем с помощью таблиц насыщенных паров:

$$t_5 = t_0 = -30 \text{ }^\circ\text{C}; p_0 = 0,164 \text{ МПа}$$

$$h_5 = h_4 = 536,5 \text{ кДж/кг}$$

$$x_5 = \frac{h_5 - h'}{r} = \frac{536,5 - 465,6}{226,32} = 0,313$$

$$v_5 = v'(1 - x_5) + v''x_5$$

$$v_5 = 0,0007239 \cdot 0,687 + 0,1351 \cdot 0,313 = 0,0428 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$s_5 = s' + \frac{rx_5}{T_0} = 0,8677 + \frac{226,32 \cdot 0,313}{243} = 1,159 \text{ кДж/(кг К)}$$

Параметры точки 6 находим в таблицах насыщенного пара по  $t_0 = -30 \text{ }^\circ\text{C}$

$$p_0 = 0,164 \text{ МПа}$$

$$v_6 = 0,135 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$h_6 = 691,6 \text{ кДж/кг}$$

$$s_6 = 1,7985 \text{ кДж/(кг К)}$$

$$x_6 = 1$$

Номер точки в цикле	Параметры					
	$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{МПа}$	$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$x$
1	-20	0,17	0,14	698	1,82	–
		0,164	0,1444	698,3	1,8252	
2	76	1,2	0,025	750	1,82	–
	76,5	1,191	0,025	750	1,8252	
3	30	1,2	0,02	713	1,71	1
		1,191	0,0197	713,57	1,7089	
4	30	1,2	–	536	1,13	0
		1,191	0,000852	536,5	1,1248	
5	-30	0,17	0,04	536	1,16	0,31
		0,164	0,0428	536,5	1,159	0,313
6	-30	0,17	0,13	692	1,8	1
		0,164	0,135	691,92	1,7985	

Примечание. В числителе приводятся значения параметров, найденные

*Теплота подведенная к рабочему телу*

$$q_0 = h_1 - h_5 = 698,3 - 536,5 = 161,8 \text{ кДж/кг}$$

$$Q_0 = q_0 M = 161,8 \frac{250}{3600} = 11,24 \text{ кВт}$$

*Теплота, отведенная от рабочего тела*

$$|q_1| = h_2 - h_5 = 750 - 536,5 = 213,5 \text{ кДж/кг}$$

$$|Q_1| = |q_1| M = 213,5 \frac{250}{3600} = 14,83 \text{ кВт}$$

*Работа цикла*

$$|l_{\text{ц}}| = h_1 - h_2 = 750 - 698,3 = 51,67 \text{ кДж/кг}$$

*Мощность двигателя компрессора кВт*

$$N_{\text{к}} = M |l_{\text{ц}}| = \frac{250}{3600} 51,67 = 3,59$$

*Холодильный коэффициент*

$$\varepsilon = \frac{q_0}{|l_{\text{ц}}|} = \frac{161,8}{51,67} = 3,13$$

**8.16.** Рассчитать цикл (определить параметры узловых точек цикла, количество подведенной и отведенной теплоты, работу цикла, холодильный коэффициент, теоретическую мощность двигателя компрессора) паровой машины, работающей на аммиаке. Температуры: кипения  $-10^\circ\text{C}$ , конденсации  $30^\circ\text{C}$ , пара, поступающего в компрессор  $-5^\circ\text{C}$ , перед регулирующим вентилем  $25^\circ\text{C}$ . Расход аммиака  $360 \text{ кг/ч}$ .

**Ответ:**  $Q_0=114,5 \text{ кВт}; |Q_1|=134,9 \text{ кВт}; N_{\text{к}}=20,3 \text{ кВт};$

$\varepsilon=5,63.$

**8.17.** Рассчитать цикл паровой холодильной машины, работающей на R12, если известны давление конденсации  $0,846 \text{ МПа}$  и кипения  $0,183 \text{ МПа}$ . Температура перед регулирующим вентилем  $25^\circ\text{C}$ . Температуру перегретого

пара перед компрессором определить из условия, что вся теплота, отнимаемая от жидкости в процессе охлаждения, расходуется на перегрев пара в регенеративном теплообменнике в изобарном процессе. Расход хладагента 100 кг/ч.

**Дано:**

$$p_0 = 0,183 \text{ МПа}$$

$$p_k = 0,846 \text{ МПа}$$

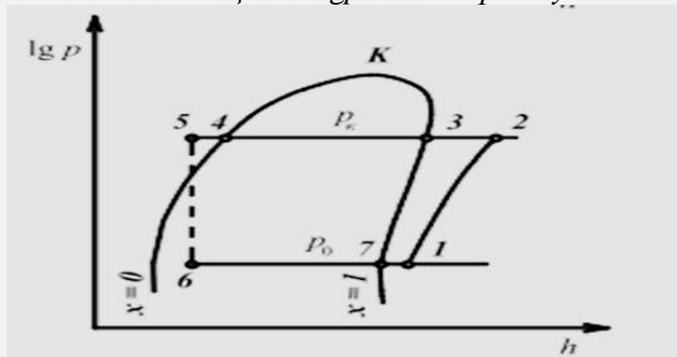
$$t_5 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$M = 100 \text{ кг/ч}$$

**Решение:**

Определяем параметры узловых точек цикла с помощью диаграммы.

Для этого вписываем цикл в  $\lg p-h$  – диаграмму.



По заданным значениям давлений находим температуру конденсации  $t_k = 35 \text{ }^\circ\text{C}$  и температуру кипения  $t_0 = -15 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Теплота, отводимая от жидкости в процессе охлаждения,

$$|q_{4-5}| = h_4 - h_5 = 432 - 424 = 8 \text{ кДж/кг};$$

$$q_{7-1} = |q_{4-5}| = c_{pm} \Delta t \text{ кДж/кг}$$

Так как данные о теплоемкости перегретого пара R12 отсутствуют, принимаем с некоторым приближением значение теплоемкости таким же, как и для сухого насыщенного пара:

$$c_{pm} = 0,57 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)};$$

$$\Delta t = \frac{q_{7-1}}{c_{pm}} = \frac{8}{0,57} = 14 \text{ K}$$

Температура пара перед компрессором:

$$t_1 = -15 + 14 = -1 \text{ }^\circ\text{C}$$

Параметры перегретого пара в точке 1 находим в таблице перегретых паров R12:

$$v_1 = 0,973 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$h_1 = 554 \text{ кДж/кг}$$

$$s_1 = 4,595 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$$

Параметры точки 2 находим в той же таблице по известным параметрам  $p_k = 0,846 \text{ МПа}$  и энтропии

$$s_2 = s_1 = 4,595 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}:$$

$$t_2 = 56 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$v_2 = 0,023 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$h_2 = 582 \text{ кДж/кг}$$

Параметры точки 3 (сухой насыщенный пар при  $t_k = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ )

находим в таблице насыщенных паров:

$$v_3 = 0,02088 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$h_3 = 566,64 \text{ кДж/кг}$$

$$s_3 = 4,546 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$$

$$x_3 = 1$$

Параметры точки 4 (насыщенная жидкость при  $t_k=35\text{ }^\circ\text{C}$ ) находим в той же таблице:

$$v_4=0,000786\text{ м}^3/\text{кг}$$

$$h_4=431,1\text{ кДж/кг}$$

$$s_4=4,116\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$$

$$x_4=0$$

Параметры точки 5 (ненасыщенная жидкость) с достаточной степенью точности определяем, как для насыщенной жидкости по температуре  $25\text{ }^\circ\text{C}$ :

$$v_5=0,764\cdot 10^{-3}\text{ м}^3/\text{кг}$$

$$h_5=424,1\text{ кДж/кг}$$

$$s_5=4,0836\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$$

Параметры точки 6 (влажный насыщенный пар) рассчитываем, пользуясь таблицами насыщенных паров:

$$t_6=-15\text{ }^\circ\text{C}$$

$$p_0=0,183\text{ МПа}$$

$$h_6=h_5=424,1\text{ кДж/кг}$$

$$x_5 = \frac{h_5 - h'}{r} = \frac{424,1 - 385,98}{159,28} = 0,24$$

$$v_5 = v'(1 - x_5) + v''x_5$$

$$v_5 = 0,693\cdot 10^{-3}\cdot 0,76 + 0,09125\cdot 0,24 = 0,0224\text{ м}^3/\text{кг}$$

$$s_5 = s' + \frac{rx_5}{T_0} = 3,9476 + \frac{159,28\cdot 0,24}{258} = 4,096\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$$

Параметры точки 7 (сухой насыщенный пар) определяем в таблицах насыщенных паров по  $t_0=-15\text{ }^\circ\text{C}$

$$p_0=0,183\text{ МПа}$$

$$v_7=0,0912\text{ м}^3/\text{кг}$$

$$h_7=545,26\text{ кДж/кг}$$

$$s_7=4,565\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$$

$$x_7=1$$

Теплота подведенная к рабочему телу

$$q_0 = h_7 - h_6 = 545,26 - 424 = 121,26\text{ кДж/кг}$$

$$Q_0 = q_0 M = 121,26 \frac{100}{3600} = 3,37\text{ кВт}$$

Теплота, отведенная от рабочего тела

$$|q_1| = h_2 - h_4 = 582 - 434,1 = 147,9\text{ кДж/кг}$$

$$|Q_1| = |q_1| M = 147,9 \frac{100}{3600} = 4,11\text{ кВт}$$

Работа цикла

$$|l_{ц}| = h_2 - h_1 = 582 - 554 = 28\text{ кДж/кг}$$

Мощность двигателя компрессора

$$N_k = M |l_{ц}| = \frac{100}{3600} 28 = 0,778\text{ кВт}$$

Холодильный коэффициент

$$\varepsilon = \frac{q_0}{|l_{ц}|} = \frac{121,26}{28} = 4,33$$

**Ответ:**  $Q_0=3,37\text{ кВт}$ ;  $|Q_1|=4,11\text{ кВт}$ ;  $N_k=0,778\text{ кВт}$ ;  $\varepsilon=4,33$ .

**8.18.** Рассчитать нижнюю ступень цикла каскадной паровой холодильной машины. Рабочим телом нижней ступени является R13. Температуры: кипения  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  и конденсации  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В компрессор поступает перегретый пар с температурой  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Температура жидкости перед регулирующим вентилем  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Расход хладагента  $72\text{ кг/ч}$ .

**Ответ:**  $Q_0=2,54\text{ кВт}$ ;  $|Q_1|=3,34\text{ кВт}$ ;  $N_k=0,798\text{ кВт}$ ;  $\varepsilon=3,18$ .

**8.19.** Как изменится расход электроэнергии для получения той же холодопроизводительности (см. условие задачи 425), если температура конденсации повысится на  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ? Все остальные характеристики цикла останутся неизменными.

**Ответ:** расход электроэнергии увеличится в  $1,08$  раза.

**8.20.** В компрессор аммиачной холодильной машины поступает влажный насыщенный пар с температурой  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  и степенью сухости  $0,95$ . После адиабатического сжатия в компрессоре образуется перегретый пар с температурой  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Температура жидкости перед регулирующим вентилем  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Определить холодильный коэффициент цикла, расход аммиака, чтобы холодопроизводительность машины равнялась  $120\text{ кВт}$ , а также расход электроэнергии на получение  $1000\text{ кДж}$  холода. Задачу решить с помощью  $\lg p-h$  – диаграммы.

**Ответ:**  $\varepsilon=3,9$ ;  $M=420\text{ кг/ч}$ ; расход электроэнергии равен  $0,073\text{ кВт}\cdot\text{ч}$  на  $1000\text{ кДж}$  холода.

**8.21.** В компрессор паровой холодильной машины с дроссельным вентилем поступает сухой насыщенный пар, в регулирующей вентиль – насыщенная жидкость. Температуры: кипения  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  и конденсации  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Сравнить удельные и объемные холодопроизводительности циклов, если рабочим телом являются аммиак и R22.

**Ответ:** для аммиака  $q_0=1072\text{ кДж/кг}$ ;  $q_v=1721\text{ кДж/м}^3$   
для R22  $q_0=152\text{ кДж/кг}$ ;  $q_v=1650\text{ кДж/м}^3$ .

**8.22.** В компрессор паровой холодильной машины поступает сухой насыщенный пар аммиака при  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Температура конденсации  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Определить (в процентах), как изменится удельная холодопроизводительность цикла, если аммиак перед регулирующим вентилем охладить до  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**Ответ:** удельная холодопроизводительность увеличится на  $5,95\%$ .

**8.23.** Определить теоретическую мощность двигателя компрессора паровой холодильной машины, работающей на R22, если известно, что в компрессор поступает перегретый пар с температурой  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Температура конденсации  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Давление в испарителе  $0,08\text{ МПа}$ . Расход хладагента  $500\text{ кг/ч}$ .

**Ответ:**  $N_T=10,8\text{ кВт}$ .

**8.24.** Рассчитать теоретический цикл теплового насоса, работающего на хладагенте R134a, если давление кипения равно  $0,4\text{ МПа}$ , давление в конденсаторе  $2,2\text{ МПа}$ . В компрессор поступает перегретый пар с температурой  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , температура жидкости перед дроссельным вентилем равна  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**Ответ:**  $q_0=126,3\text{ кДж/кг}$ ;  $|q_1|=163,8\text{ кДж/кг}$ ;

$$|l_u| = 37,5 \text{ кДж/кг}; \mu = 4,37.$$

**8.25.** Как изменяется удельная холодопроизводительность и холодильный коэффициент машины, работающей на R12, R22, R134a и R125, если в компрессор поступает сухой насыщенный пар при температуре  $-20^\circ\text{C}$ , а в дроссельный вентиль – насыщенная жидкость при  $20^\circ\text{C}$ .

$$\begin{aligned} \text{Ответ: } q_{R12} &= 123,7 \text{ кДж/кг}; \varepsilon_{R12} = 5,37 \\ q_{R22} &= 172,6 \text{ кДж/кг}; \varepsilon_{R22} = 5,34 \\ q_{R134a} &= 159,3 \text{ кДж/кг}; \varepsilon_{R134a} = 5,34 \\ q_{R125} &= 96,9 \text{ кДж/кг}; \varepsilon_{R125} = 4,79. \end{aligned}$$

**8.26.** В цикле паровой холодильной машины в компрессор поступает сухой насыщенный пар хладагента R13, а в дроссельный вентиль – его насыщенная жидкость при температуре  $-17^\circ\text{C}$ . Определить холодильный коэффициент и удельную холодопроизводительность цикла, если известно, что в процессе дросселирования энтропия хладагента увеличивается на  $0,0715 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ . Расчет произвести с помощью диаграммы  $\lg p-h$ , а затем проверить, используя таблицы термодинамических свойств.

$$\text{Ответ: } q_0 = 81,7 \text{ кДж/кг}; \varepsilon = 1,49.$$

**8.27.** Компрессор холодильной машины всасывает сухой насыщенный пар аммиака с температурой  $-20^\circ\text{C}$ . В дроссельный вентиль холодильной машины поступает насыщенная жидкость. Определить температуру конденсации аммиака, удельную холодопроизводительность цикла, холодильный коэффициент, если отношение давлений конденсации и испарения составляет  $p_k/p_0 = 4,511$ .

$$\text{Ответ: } q_0 = 1144 \text{ кДж/кг}; \varepsilon = 5,35.$$

**8.28.** В аммиачной паровой холодильной машине давление пара после компрессора  $1,35 \text{ МПа}$ , а температура  $120^\circ\text{C}$ . Температура жидкости перед регулирующим вентилем  $30^\circ\text{C}$ . Расход аммиака  $750 \text{ кг/ч}$ . Определить расход охлаждающей воды в конденсаторе на сбив перегрева, конденсацию и переохлаждение аммиака, если ее температура повышается на  $8^\circ\text{C}$ .

$$\text{Ответ: } M_w = 22,9 \text{ кг/с}.$$

**8.29.** Как изменится удельная холодопроизводительность и теоретическая мощность двигателя компрессора паровой холодильной машины, если вместо R12 в ней использовать R22? Предположить, что режим работы сохранится неизменным и будет определяться температурами: кипения  $-20^\circ\text{C}$ , конденсации  $30^\circ\text{C}$ , пара перед компрессором  $-10^\circ\text{C}$  и перед регулирующим вентилем  $25^\circ\text{C}$ .

$$\text{Ответ: } q_{0R22}/q_{0R12} = 1,36; N_{R22}/N_{R12} = 1,43.$$

**8.30.** В компрессор холодильной машины поступает перегретый пар аммиака при температуре  $-10^\circ\text{C}$  и давлении  $0,1 \text{ МПа}$  и сжимается до давления  $1 \text{ МПа}$ . Сравнить расчетные значения холодильного коэффициента цикла, если в первом случае сжатие пара в компрессоре, как обычно, полагать адиабатным ( $\kappa = 1,29$ ), а во втором – происходящим по политропе с показателем  $n = 1,45$ . В обоих случаях параметры рабочего тела всех узловых точек цикла (кроме состояния пара после компрессора) считать одинаковыми.

$$\text{Ответ: } \varepsilon_{\text{ад}}/\varepsilon_{\text{пол}} = 1,12.$$

## Глава 9. Смеси идеальных газов

Смеси идеальных газов подчиняются тем же законам, что и отдельные идеальные газы. Каждый газ в смеси независимо от других газов полностью сохраняет все свои свойства и ведет себя так, если бы он один занимал бы весь объем.

Давление смеси газов равно сумме парциальных давлений компонентов смеси (закон Дальтона)

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n = \sum p_i \quad . \quad (9.1)$$

Объем смеси газов равен сумме парциальных объемов, т. е. объемов отдельных компонентов, приведенных к давлению и температуре смеси:

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n = \sum V_i \quad . \quad (9.2)$$

Парциальным объемом компонента называют тот условный объем, который занимал бы компонент, если при температуре смеси его давление от парциального было бы доведено до давления смеси.

Для газовой смеси справедливо уравнение состояния идеального газа, если в него вводится газовая постоянная смеси:

$$pV = MR_{\text{см}}T,$$

Состав газовой смеси может быть задан:

– массовыми долями –  $g_1, g_2, \dots, g_n$

$$g_i = \frac{M_i}{M_{\text{см}}}, \quad (9.3)$$

– объемными долями –  $r_1, r_2, \dots, r_n$

$$r_i = \frac{V_i}{V_{\text{см}}} \quad . \quad (9.4)$$

Объемные доли могут быть также найдены как отношение числа молей компонента к общему числу молей всей смеси:

$$r_i = \frac{\mu_i}{\mu_{\text{см}}}, \quad (9.5)$$

$$\sum g_i = 1, \quad \sum r_i = 1.$$

Способы задания состава смеси представлены в табл. 9.1.

Таблица 9.1

Способ задания состава смеси	Выражение массовых долей через объемные и объемных через массовые	Плотность смеси и удельный объем смеси	Кажущаяся молярная масса смеси	Газовая постоянная смеси газов	Парциальное давление
Массовыми долями	$r_i = \frac{g_i}{\sum \frac{g_i}{\mu_i}}$	$v_{см} = \sum g_i v_i$ $\rho_{см} = \frac{1}{\sum \frac{g_i}{\rho_i}}$	$\mu_{см} = \frac{1}{\sum \frac{g_i}{\mu_i}}$	$R_{см} = \sum g_i R_i$ $R_{см} = 8314 \sum \frac{g_i}{\mu_i}$	$p_i = g_i \frac{R_i}{R_{см}} p_{см}$
Объемными долями	$g_i = \frac{r_i \mu_i}{\sum r_i \mu_i}$	$v_{см} = \frac{1}{\sum \frac{r_i}{v_i}}$ $\rho_{см} = \sum r_i \rho_i$	$\mu_{см} = \sum r_i \mu_i$	$R_{см} = \frac{1}{\sum \frac{r_i}{R_i}}$ $R_{см} = \frac{8314}{\sum r_i \mu_i}$	$p_i = r_i p_{см}$

## Задачи

**9.1.** Образец холодильной машины работает на смеси R12 и R22. В компрессор всасывается смесь перегретых паров этих хладонов при температуре  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  и давлении  $0,1\text{ МПа}$ . Массовая доля R12 равна  $0,35$ . Условно полагая, что к перегретым парам хладонов применимы законы идеальных газов, определить удельный объем поступающей в компрессор смеси.

<p><b>Дано:</b>  <math>t = -10\text{ }^{\circ}\text{C}</math>  <math>p = 0,1\text{ МПа}</math>  <math>g_{R12} = 0,35</math></p>	<p><b>Решение:</b>                  Массовая доля R22  <math>g_{R22} = 1 - g_{R12} = 0,65</math>                  Газовая постоянная смеси  <math>R = R_{R12}g_{R12} + R_{R22}g_{R22} = 68,8 \cdot 0,35 + 96,1 \cdot 0,65 = 86,7\text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})</math></p>
<p><math>v = ?</math></p>	<p>Удельный объем смеси  <math>v = \frac{RT}{p} = \frac{86,7 \cdot 263}{10^5} = 0,228\text{ м}^3/\text{кг}</math></p>

**9.2.** В некоторых случаях для получения сухого льда используют диоксид углерода, образующийся в результате процесса брожения. В ходе такого процесса содержание диоксида углерода в его смеси с воздухом достигает  $85\%$  (по массе). Определить объем газгольдера, содержащего  $1000\text{ кг}$  смеси воздуха и  $\text{CO}_2$  (названной концентрации) при температуре  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  и давлении  $150\text{ кПа}$ .

**Ответ:**  $V = 397,7\text{ м}^3$ .

**9.3.** Атмосферный воздух имеет следующий состав по массе:  $g_{\text{O}_2} = 23,2\%$ ,  $g_{\text{N}_2} = 76,8\%$ . Найти состав воздуха по объему, его газовую постоянную, кажущуюся молекулярную массу и парциальные давления газов, если давление воздуха  $987\text{ гПа}$ .

**Ответ:**  $r_{\text{O}_2} = 20,9\%$ ;  $r_{\text{N}_2} = 79,1\%$ ;  $R_{\text{см}} = 288,2\text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  
 $\mu_{\text{см}} = 28,85\text{ кг}/\text{кмоль}$ ;  $p_{\text{O}_2} = 206\text{ гПа}$ ;  $p_{\text{N}_2} = 781\text{ гПа}$ .

**9.4.** Для исследования морского шельфа иногда используют подводные лаборатории с открытым выходом в море. В этом случае из-за значительной растворимости азота воздуха в крови человека при высоких давлениях используют специальные дыхательные смеси. Определить плотность дыхательной смеси в лаборатории, находящейся на глубине  $102\text{ м}$ ; температура в лаборатории  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; атмосферное давление  $100\text{ кПа}$ . Состав смеси в объемных долях: кислорода  $3\%$ , азота  $7,3\%$ , гелия  $89,7\%$ . Определить также массовую долю кислорода в смеси и его парциальное давление.

**Ответ:**  $\rho_{\text{см}} = 3,08\text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $g_{\text{O}_2} = 0,146$ ;  $p_{\text{O}_2} = 0,033\text{ МПа}$ .

**9.5.** Состав смеси по массе следующий:  $\text{CO}_2 = 14\%$ ;  $\text{O}_2 = 10\%$ ;  $\text{N}_2 = 76\%$ . До какого давления нужно сжать эту смесь, чтобы при температуре  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  ее плотность была  $1,8\text{ кг}/\text{м}^3$ ?

**Ответ:**  $p = 0,287\text{ МПа}$ .

**9.6.** Определить плотность пропана и диоксида углерода, а также их эквимолярной смеси при температуре  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  и давлении  $80\text{ кПа}$ .

**Ответ:** 1,003; 1,001 и 1,002 кг/м<sup>3</sup> соответственно.

**9.7.** Как изменится плотность смеси угарного газа и азота при давлении 0,2 МПа и температуре 63 °С, если массовая доля азота в смеси возрастает с 0,2 до 0,8?

**Ответ:** понизится с 2,002 до 1,999 кг/м<sup>3</sup>.

**9.8.** Парциальное давление азота в газовой смеси, состоящей из азота и гелия,  $p_{N_2} = 50$  кПа. Найти состав смеси в массовых долях, если давление смеси  $p_{см} = 200$  кПа.

**Ответ:**  $g_{N_2} = 0,7$ ;  $g_{He} = 0,3$ .

**9.9.** Газовая постоянная смеси водорода и азота равна 883 Дж/(кг·К). Найти массовые доли водорода и азота в смеси и их парциальные давления, если давление смеси 1080 гПа.

**Ответ:**  $g_{H_2} = 15,3\%$ ;  $g_{N_2} = 84,7\%$ ;  $p_{H_2} = 770,7$  гПа;  $p_{N_2} = 309,7$  гПа

**9.10.** Какой объемный состав должна иметь смесь гелия и аргона, чтобы ее удельный объем оказался равным удельному объему кислорода при тех же значениях температуры и давления, что и у смеси?

**Ответ:**  $r_{He} = 0,221$ ;  $r_{Ar} = 0,779$ .

**9.11.** Найти плотность влажного воздуха, выходящего из калорифера при температуре 70 °С и давлении 1000 гПа, если известно, что парциальное давление водяного пара 20 кПа. Сравнить ее с плотностью сухого воздуха тех же параметров.

**Ответ:**  $\rho_{вл.в.} = 0,939$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{с.в.} = 1,016$  кг/м<sup>3</sup>, т.е. плотность сухого воздуха больше плотности влажного воздуха в 1,08 раза.

**9.12.** Определить состав по объему, удельную газовую постоянную и плотность при нормальных физических условиях смеси, состоящей по массе из 95 % воздуха и 5 % светильного газа. Удельная газовая постоянная светильного газа 721 Дж/(кг·К).

**Ответ**  $r_B = 88,3\%$ ;  $r_{с.г.} = 11,7\%$ ;  $R_{см} = 308,7$  Дж/(кг·К);  
 $\rho_{см} = 1,202$  кг/м<sup>3</sup>.

**9.13.** Определить плотность бинарной смеси хладагента RС318 (октафторциклобутана) и водорода с объемной (1-случай) и массовой (2-случай) долей каждого компонента 50% при нормальном атмосферном давлении и температуре 410 К.

**Ответ:**  $\rho = 3,003$  кг/м<sup>3</sup> (1 - случай);  $\rho = 0,1187$  кг/м<sup>3</sup> (2 - случай)

**9.14.** Во сколько раз изменится плотность азотоводородной смеси при неизменных температуре и давлении, если объемная доля водорода увеличится с 0,2 до 0,8.

**Ответ:** уменьшится в 3,16 раза.

**9.15.** Смесь газов состоит из кислорода и диоксида углерода. Объемная доля кислорода равна 40%. Избыточное давление смеси 0,392 МПа, температура

300 °С, объем 6 м<sup>3</sup>. Определить массу смеси газов. Атмосферное давление 1026 гПа.

**Ответ:**  $M_{см}=24,4$  кг.

**9.16.** Смесь газов, состоящая из кислорода и сернистого ангидрида SO<sub>2</sub>, находится под давлением 0,5 МПа. Каков состав смеси по объему и массе, если известно, что парциальное давление кислорода 0,4 МПа?

**Ответ:**  $r_{O_2}=0,8$ ;  $r_{SO_2}=0,2$ ;  $g_{O_2}=0,667$ ;  $g_{SO_2}=0,333$ .

**9.17.** В одном из двух баллонов находится гелий при давлении 15 МПа, а в другом — аргон при давлении 5 МПа. Температура обоих газов 50 °С. Вместимость каждого из баллонов 10 л. В какой-то момент баллоны соединяются так, что оба газа могут свободно перемешиваться. Какое давление установится при этом в баллонах, если температура газов останется равной 50 °С?

<p><b>Дано:</b>  <math>P_{He}=15</math> МПа  <math>P_{Ar}=5</math> МПа  <math>V=10</math> л  <math>t=50</math> °С</p> <hr/> <p><math>p</math> —?</p>	<p><b>Решение:</b>  Определим массу аргона и гелия в каждом из баллонов</p> $M_{He} = \frac{p_{He}V}{R_{He}T} = \frac{15 \cdot 10^6 \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{2078 \cdot 323} = 0,2235 \text{ кг}$ $M_{Ar} = \frac{p_{Ar}V}{R_{Ar}T} = \frac{5 \cdot 10^6 \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{208,2 \cdot 323} = 0,7435 \text{ кг}$ <p>Масса смеси</p> $M = M_{He} + M_{Ar} = 0,2235 + 0,7435 = 0,967 \text{ кг}$ <p>Массовые доли</p> $g_{He} = \frac{M_{He}}{M} = \frac{0,2235}{0,967} = 0,231$ $g_{Ar} = \frac{M_{Ar}}{M} = \frac{0,7435}{0,967} = 0,769$ <p>Газовая постоянная смеси</p> $R = R_{He}g_{He} + R_{Ar}g_{Ar} = 2078 \cdot 0,231 + 208,2 \cdot 0,769 = 603 \text{ Дж}/(\text{кг К})$ <p>Давление смеси</p> $p = \frac{MRT}{V} = \frac{0,967 \cdot 603 \cdot 323}{0,02} = 9,42 \text{ МПа}$
--	--

**9.18.** Дыхательная смесь кислорода и гелия имеет плотность 0,77 кг/м<sup>3</sup> при температуре 300 К и давлении 200 кПа. Определить объемный и массовый состав смеси.

**Ответ:**  $r_{O_2}=0,8$ ;  $r_{He}=0,2$ ;  $g_{O_2}=0,6665$ ;  $g_{He}=0,3335$ .

**9.19.** 0,5 кмоль хладагента R125 смешивают с азотом объемом 15 м<sup>3</sup> при температуре 30 °С и давлении 120 кПа. Определить массовый и объемный состав смеси.

**Ответ:**  $r_{R125}=0,412$ ;  $r_{N_2}=0,588$ ;  $g_{R125}=0,75$ ;  $g_{N_2}=0,25$ .

**9.20.** Воздух в количестве 0,3 м<sup>3</sup> смешивается с диоксидом углерода в количестве 0,5 кг. Параметры обоих газов до смешения следующие:  $p=0,6$  МПа и  $t=41$  °С. Найти парциальное давление диоксида углерода после смешения.

**Ответ:**  $p_{CO_2}=85$  кПа.

**9.21.** При давлении 0,11 МПа и температуре 7 °С плотность смеси кислорода и диоксида углерода 1,57 кг/м<sup>3</sup>. Определить состав смеси по массе и объему.

**Ответ:**  $r_{O_2}=89,4\%$ ;  $r_{CO_2}=10,6\%$ ;  $g_{O_2}=86\%$ ;  $g_{CO_2}=14\%$ .

**9.22.** В результате утечки аммиака из холодильной машины его парциальное давление в помещении достигло 20 кПа. Создалась ли опасность взрыва смеси аммиака и воздуха, если известно, что взрыв может произойти при концентрации аммиака 12 % по массе? Атмосферное давление 1000 гПа.

**Ответ:**  $g_{NH_3}=12,8\%$ , концентрация аммиака является взрывоопасной.

**9.23.** В резервуаре вместимостью 20 м<sup>3</sup> под давлением 0,26 МПа находится газовая смесь, состоящая из азота (10 кг), кислорода (8 кг) и диоксида углерода (некоторое количество). Температура смеси 27 °С. Найти массу  $CO_2$  в смеси, парциальные давления компонентов, состав смеси по объему, кажущуюся молекулярную массу и газовую постоянную.

**Ответ:**  $M_{CO_2}=65$  кг;  $p_{N_2}=44,55$  кПа;  $p_{O_2}=31,2$  кПа;  
 $p_{CO_2}=184,24$  кПа;  $r_{N_2}=17,1\%$ ;  $r_{O_2}=12\%$ ;  $r_{CO_2}=70,9\%$ ;  
 $\mu_{см}=39,86$  кг/кмоль;  $R_{см}=208,6$  Дж/(кг·К).

**9.24.** Определить парциальное давление и массовую концентрацию аммиака в воздухе машинного зала объемом 250 м<sup>3</sup> после утечки в него 500 г аммиака. Считать, что аммиак равномерно распределился в машинном зале. Атмосферное давление принять 100 кПа, температуру 20 °С.

**Ответ:**  $p_{NH_3}=286,2$  кПа;  $g_{NH_3}=0,0017$ .

**9.25.** В адиабатной смесительной камере смешиваются 0,5 кг/с перегретого водяного пар с давлением 0,2 МПа и температурой 550 °С и 0,4 кг/с сухого насыщенного водяного пара с давлением 0,2 МПа. Определить с помощью термодинамических таблиц и диаграмм удельные параметры смеси, при условии, что потоки движутся с незначительной скоростью.

**Дано:**  
 $p_1=0,2$  МПа  
 $t_1=550$  °С  
 $M_1=0,5$  кг/с  
 $p_2=0,2$  МПа  
 $x_2=1$   
 $M_2=0,4$  кг/с

?

**Решение:**

Масса смеси

$$M = M_1 + M_2 = 0,5 + 0,4 = 0,9 \text{ кг/с}$$

Массовые доли

$$g_1 = \frac{M_1}{M} = \frac{0,4}{0,9} = 0,44$$

$$g_2 = \frac{M_2}{M} = \frac{0,5}{0,9} = 0,56$$

Из таблиц перегретого водяного пара

$$h_1=3594,5 \text{ кДж/кг}$$

$$s_1=8,6485 \text{ кДж/(кг К)}$$

таблиц насыщенного водяного пара

$$h_2=2706,9 \text{ кДж/кг}$$

$$s_2=7,1286 \text{ кДж/(кг К)}$$

вода при  $p_0=0,1$  МПа и  $t_0=20$  °С

$$h_0=84 \text{ кДж/кг}$$

$$s_0=0,2963 \text{ кДж/(кг К)}$$

*Энтальпия смеси*

$$h = g_1 h_1 + g_2 h_2 = 0,44 \cdot 2706,9 + 0,56 \cdot 3594,5 = 3203,9 \text{ кДж/кг}$$

*Из таблиц термодинамические свойства воды и водяного пара при  $p=0,2$  МПа и  $h=3203,9$  кДж/кг с помощью интерполяции находим  $t=364,9$  °С*

$$v = 1,467 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$s = 8,1115 \text{ кДж}/(\text{кг К})$$

*Удельные эксергии*

$$e_1 = h_1 - h_0 - T_0 (s_1 - s_0) = 2706,9 - 84 - 293(7,1268 - 0,2963) = 621,0$$

$$e_2 = h_2 - h_0 - T_0 (s_2 - s_0) = 3594,5 - 84 - 293(8,6485 - 0,2963) = 1063,3$$

$$e = h - h_0 - T_0 (s - s_0) = 3203,9 - 84 - 293(8,1115 - 0,2963) = 830,0$$

$$\Delta s_{\text{необр}} = s + (g_1 s_1 + g_2 s_2) = 8,1115 - (0,44 \cdot 7,1286 + 0,56 \cdot 8,6485) = 0,3118$$

**9.26.** Для нужд отопления требуется 4 кг/с воды с температурой 80 °С. Для этого сухой насыщенный водяной пар и вода при температуре 20 °С адиабатически смешиваются при постоянном давлении 2 МПа, скорости которых пренебрежимо малы. Определите массовые расходы воды и сухого насыщенного пара.

**Ответ:**  $m_{\text{в}}=3,63$  кг/с;  $m_{\text{п}}=0,37$  кг/с.

**9.27.** В смесительной камере смешиваются 0,3 кг/с влажного водяного пара с давлением 0,2 МПа и степенью сухости 0,83 и 0,2 кг/с перегретого водяного пара с тем же давлением и температурой 290 °С. Определите термодинамические параметры смеси, если в камеру смешения введен тепловой поток мощностью 35 кВт, а кинетической энергией потоков пренебречь.

**Ответ:**  $t=120$  °С;  $v=0,89$  м<sup>3</sup>/кг;  $l=2708$  кДж/кг;  $s=7,13$  кДж/(кг·К).

## Глава 10. Влажный воздух

Влажным воздухом называют смесь сухого воздуха и воды. Вода может присутствовать во влажном воздухе в различных состояниях. Если во влажном воздухе содержится перегретый водяной пар, то такой влажный воздух называют ненасыщенным. Если во влажном воздухе содержится сухой насыщенный пар – влажный воздух называют насыщенным. Если во влажном воздухе, помимо сухого насыщенного пара, присутствует капельная или кристаллическая влага, то состояние влажного воздуха определяется как состояние тумана.

Максимальное давление водяного пар в воздухе соответствует давлению насыщения при температуре воздуха. Обычно парциальное давление водяного пар во влажном воздухе невелико, и влажный воздух условно можно рассматривать как смесь газов, подчиняющуюся законам идеальных газов.

Абсолютной влажностью воздуха называют массу водяного пара, содержащегося в  $1 \text{ м}^3$  влажного воздуха, или (что то же самое) плотность пара при его парциальном давлении и температуре воздуха

$$e = \rho_{\text{п}}. \quad (10.1)$$

Относительная влажность представляет собой отношение абсолютной влажности воздуха в данном состоянии к абсолютной влажности насыщенного воздуха при той же температуре:

$$\varphi = \frac{e}{e''} = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{п}}''}, \quad (10.2)$$

где  $p_{\text{п}}$  – парциальное давление пара во влажном воздухе данного состояния;  $p_{\text{п}}''$  – давление сухого насыщенного пара при той же температуре.

Влагосодержание – количество водяного пара (влаги), приходящееся на 1 кг сухого воздуха:

$$d = \frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{г}}} = 0,622 \frac{p_{\text{п}}}{p - p_{\text{п}}}, \quad (10.3)$$

где  $M_{\text{п}}$ ,  $M_{\text{г}}$  – масса пара и сухого воздуха;  $p_{\text{п}}$  и  $p$  – давление пара и влажного воздуха ( $p = p_{\text{г}} + p_{\text{п}}$ ).

Степенью насыщения называют отношение влагосодержания воздуха в данном состоянии к влагосодержанию насыщенного воздуха при той же температуре:

$$\psi = \frac{d}{d''} = \frac{\varphi(p - p''_{\text{п}})}{p - p_{\text{п}}}. \quad (10.4)$$

Плотность влажного воздуха можно определить из уравнения

$$\rho = \frac{p}{287 \cdot T} - 0,0129 \frac{\varphi p''_{\text{п}}}{T}. \quad (10.5)$$

Энтальпию влажного воздуха можно представить как сумму энтальпий сухого воздуха  $h_{\text{г}}$  и водяного пара  $h_{\text{п}}d$ :

$$h = h_{\text{г}} + h_{\text{п}}d, \quad (10.6)$$

для ненасыщенного влажного воздуха

$$h = t + (2500 + 1,89t)d, \quad (10.7)$$

для насыщенного влажного воздуха

$$h'' = t + (2500 + 1,89t)d'', \quad (10.8)$$

для влажного воздуха, содержащего капельную и кристаллическую влагу (состояние смешанного тумана),

$$h_{\text{г}} = t + (2500 + 1,89t)d'' + 4,19d_{\text{ж}} + (2,09t - 335)d_{\text{л}}, \quad (10.9)$$

где 2500 – теплота парообразования воды при 0 °С, кДж/кг;  
 1,89; 4,19; 2,09 – теплоемкость, соответственно, перегретого водяного пара, воды, льда, кДж/(кг·К);  
 $d$ ,  $d_{\text{ж}}$ ,  $d_{\text{л}}$  – масса, соответственно, сухого насыщенного пар, капельной жидкости и льда, приходящаяся на 1 кг сухого воздуха.

## Задачи

**10.1.** Парциальное давление водяного пара во влажном воздухе 20 гПа. Температура воздуха 30 °С. Определить абсолютную влажность воздуха.

<p><i>Дано:</i>  <math>p_n = 20</math> гПа  <math>t_1 = 30</math> °С</p>	<p><i>Решение:</i>                  Парциальному давлению водяного пара <math>p_n = 20</math> гПа соответствует температура насыщения 17,5 °С.                  Следовательно, при <math>t_1 = 30</math> °С – пар перегрет.                  По таблицам термодинамических свойств воды и водяного пара находим: <math>v = 69,9</math> м<sup>3</sup>/кг  <math display="block">e = \rho_n = \frac{1}{v} = \frac{1}{69,9} = 0,0143 \text{ кг/м}^3</math></p>
<p><math>e = ?</math></p>	

**10.2.** Температура влажного воздуха 28,98 °С, давление 1020 гПа. Парциальное давление сухого воздуха 980 гПа. Определить абсолютную влажность воздуха.

*Ответ:*  $e'' = \rho'' = 0,0288$  кг/м<sup>3</sup>.

**10.3.** Парциальное давление водяного пара во влажном воздухе 10 гПа. Температура воздуха 20 °С. Определить относительную влажность воздуха.

<p><i>Дано:</i>  <math>p_n = 10</math> гПа  <math>t_1 = 20</math> °С</p>	<p><i>Решение:</i>                  Парциальному давлению водяного пара <math>p_n = 10</math> гПа соответствует температура насыщения 7 °С.                  Следовательно, при <math>t_1 = 20</math> °С – пар перегрет.                  По таблицам термодинамических свойств воды и водяного пара находим: <math>v = 135</math> м<sup>3</sup>/кг; <math>p_n'' = 2,337</math> кПа; <math>v'' = 57,8</math> м<sup>3</sup>/кг                  Относительная влажность можно определить двумя способами:</p>
<p><math>\varphi = ?</math></p>	<p>1) <math display="block">\varphi = \frac{e}{e''} = \frac{\rho}{\rho''} = \frac{v''}{v} = \frac{57,8}{135} = 0,428</math></p> <p>2) <math display="block">\varphi = \frac{p_n}{p_n''} = \frac{1}{2,337} = 0,428</math></p>

**10.4.** Компрессор всасывает влажный воздух, относительная влажность которого 80%, а температура 17 °С, и подает его в систему пневматического регулирования. Сколько водяного пара попадает в систему в течение 1 ч, если расход воздуха 100 м<sup>3</sup>/ч?

*Ответ:*  $M_n = 1,16$  кг/ч.

**10.5.** Температура атмосферного воздуха -20 °С, относительная влажность 90%. Определить парциальное давление водяного пара в воздухе.

*Ответ:*  $p_n = 92,6$  Па.

**10.6.** В термобарокамере объемом 1 м<sup>3</sup> находится влажный ненасыщенный воздух с температурой 10 °С, давлением 666,5 гПа и относительной влажностью 70%. Какими способами можно превратить находящийся в камере воздух в насыщенный? Обязательным требованием при этом является сохранение неизменным давления воздуха в камере.

<p><b>Дано:</b>  <math>V=1 \text{ м}^3</math>  <math>t_1=10 \text{ }^\circ\text{C}</math>  <math>p_{\text{п}}=666,5 \text{ гПа}</math>  <math>\varphi=70\%</math></p>	<p><b>Решение:</b>  <b>Способ 1.</b>  Понизить температуру в камере до температуры насыщения, соответствующей давлению водяного пара 859 Па, т.к.  <math>p_{\text{п}} = p_{\text{п}}'' \cdot \varphi = 1227 \cdot 0,7 = 859 \text{ Па}</math> температура равна 4,6 °С.  При этом способе давление в камере понизится до ~653 гПа из-за понижения температуры.  Для поддержания давления на прежнем уровне в камеру необходимо добавить некоторое количество (~16,4) сухого воздуха.  <b>Способ 2.</b>  Добавить в воздух камеры некоторое количество водяного пара, равное:</p> $e'' - e = e'' - \varphi e'' = e'' - (1 - \varphi) e'' = \rho'' (1 - \varphi) = \frac{1}{v''} (1 - \varphi)$ $e'' - e = \frac{1}{106,4} (1 - 0,7) = 0,0028 \text{ кг/м}^3$
---	---

**10.7.** Найти плотность влажного воздуха с давлением 1000 гПа, температурой 27 °С и относительной влажностью 80 %. Плотность влажного и сухого воздуха сравнить при тех же давлении и температуре.

<p><b>Дано:</b>  <math>p=1000 \text{ гПа}</math>  <math>t=27 \text{ }^\circ\text{C}</math>  <math>\varphi=80\%</math></p>	<p><b>Решение:</b>  Плотность влажного воздуха</p> $\rho = \frac{p}{287 \cdot T} - 0,0129 \frac{\varphi p''}{T} = \frac{10^5}{287 \cdot 300} - 0,0129 \frac{0,8 \cdot 1936}{300} = 1,094 \text{ кг/м}^3$
<p><math>\rho - ?</math></p>	<p>Плотность сухого воздуха при <math>B=1000 \text{ гПа}</math> – <math>\rho_{\text{г}}=1,161 \text{ кг/м}^3</math> (из табл.)</p> $\Delta\rho = \frac{1,161 - 1,094}{1,161} = 0,058 = 5,8\%$

**10.8.** Давление влажного воздуха 1013 гПа и температура 50 °С. Парциальное давление водяного пара в нем 0,005 МПа. Определить относительную влажность, влагосодержание и степень насыщения воздуха.

**Ответ:**  $\varphi=0,407$ ;  $d=0,0323 \text{ кг/кг}$ ;  $\psi=0,376$ .

**10.9.** Температура воздуха 15 °С и влагосодержание 5 г/кг. Определить относительную влажность воздуха в этом состоянии, а также после того, как он будет подогрет до 30 °С. Барометрическое давление 1020 гПа.

**Ответ:**  $\varphi_1=0,477$ ;  $\varphi_2=0,192$ .

**10.10.** Найти влагосодержание воздуха, если его давление 980 гПа, температура 50 °С и относительная влажность 40,5%.

<p><b>Дано:</b>  <math>P_{\text{п}}=980 \text{ гПа}</math>  <math>t=50 \text{ }^\circ\text{C}</math>  <math>\varphi=40,5 \%</math></p>	<p><b>Решение:</b>  При <math>t=50 \text{ }^\circ\text{C}</math> <math>p_{\text{п}}''=12335 \text{ Па}</math>  <math>p_{\text{п}} = p_{\text{п}}'' \cdot \varphi = 12335 \cdot 0,405 = 5000 \text{ Па}</math>  1. По таблицам перегретого пара при <math>P_{\text{п}}=980 \text{ гПа}</math> и <math>t=50 \text{ }^\circ\text{C}</math>  <math>v_{\text{п}}=29,78 \text{ м}^3/\text{кг}</math>;</p>
<p><math>d - ?</math></p>	$\rho_{\text{п}} = \frac{1}{29,78} = 0,00336 \text{ кг/м}^3$ <p>Парциальное давление сухого воздуха</p>

	$p_r = B - p_n = 98000 - 5000 = 93000 \text{ Па}$ <p><i>Плотность сухого воздуха</i></p> $\rho_r = \frac{p_r}{R_r T} = \frac{93000}{287 \cdot 323} = 1 \text{ кг/м}^3$ <p><i>Влагосодержание</i></p> $d = \frac{M_n}{M_r} = \frac{p_n}{\rho_r} = \frac{0,0336}{1} = 0,0336 \text{ кг/кг}$ $2. d = 0,622 \frac{p_n}{B - p_n} = 0,622 \frac{5000}{98000 - 5000} = 0,0335 \text{ кг/кг}$
--	---

**10.11.** Определить энтальпию и температуру точки росы влажного воздуха, параметры которого указаны в условии задачи 10.10.

<b>Дано:</b> $p_n=980 \text{ гПа}$ $t=50 \text{ }^\circ\text{C}$ $\varphi=40,5 \%$	<b>Решение:</b> <i>Энтальпия влажного воздуха</i> $h = c_r t + (2500 + 1,89t)d = 1 \cdot 50 + (2500 + 1,89 \cdot 50)0,0336 = 137,3 \text{ кДж/кг}$ <i>Температура точки росы определяется, как температура насыщения, соответствующая давлению водяного пара 5000 Па</i> $t_p=32,9 \text{ }^\circ\text{C}$
$t_p, h - ?$	

**10.12.** Степень насыщения влажного воздуха 0,3, температура 60 °С. Барометрическое давление 1000 гПа. Определить относительную влажность воздуха.

**Ответ:**  $\varphi=34,9 \%$ .

**10.13.** Как изменится степень насыщения влажного воздуха в процессе его нагревания от 10 до 60 °С при постоянном влагосодержании? Относительная влажность в начальном состоянии 80%. Барометрическое давление 1000 гПа.

**Ответ:** степень насыщения изменяется от 79,8 до 4 %

**10.14.** Температуры влажного воздуха 15 °С и точки росы 5 °С. Барометрическое давление 1013 гПа. Определить относительную влажность, влагосодержание и энтальпию влажного воздуха.

**Ответ:**  $\varphi=51\%$ ;  $d=0,0054 \text{ кг/кг}$ ;  $h=28,7 \text{ кДж/кг}$

**10.15.** В первую ступень двухступенчатого воздушного компрессора поступает воздух ( $p_1=0,098 \text{ МПа}$ ,  $t_1=20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $d_1=6 \text{ г/кг}$ ). В первой ступени его давление повышается в 5 раз, после чего он охлаждается в водяном теплообменнике до 25 °С. Будет ли в этом теплообменнике происходить конденсация водяного пара, содержащегося в воздухе?

<b>Дано:</b> $p_1=0,098 \text{ МПа}$ $t_1=20 \text{ }^\circ\text{C}$ $d_1=6 \text{ г/кг}$ $p_2=5p_1$ $t_3=25 \text{ }^\circ\text{C}$	<b>Решение:</b> <i>Парциальное давление водяного пара во влажном воздухе до сжатия</i> $p_{n1} = \frac{p_1 d_1}{0,622 + d} = \frac{98 \cdot 10^3 \cdot 0,006}{0,622 + 0,006} = 935 \text{ Па}$ <i>После сжатия парциальное давление водяного пар также возрастет в 5 раз</i> $p_{n2} = 5 \cdot p_{n1} = 5 \cdot 935 = 4675 \text{ Па}$
$t_{3н} - ?$	

Такому давлению пара соответствует температура насыщения (т.е. температура точки росы)  $31,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .  
Так как воздух охлаждается до  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , то при этом будет происходить конденсация водяного пара

**10.16.** Состояние влажного воздуха характеризуется температурами сухого термометра  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  и влажного  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Определить с помощью  $h-d$  – диаграммы, как изменится относительная влажность воздуха, если его влагосодержание уменьшится на  $7,5\text{ г/кг}$  при постоянной температуре.

**Ответ:**  $\varphi_1=70\text{ }%$ ;  $\varphi_2=50\text{ }%$

**10.17.** Влажный воздух с температурой  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  и относительной влажностью  $0,56$  охлаждается до  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а затем снова нагревается до  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Определить с помощью  $h-d$  – диаграммы, какое количество влаги выпадает при этом из воздуха на холодной поверхности воздухоохладителя (в расчете на  $1\text{ кг}$  сухого воздуха).

**Ответ:**  $\Delta d=3,5\text{ г/кг}$

**10.18.** Определить с помощью  $h-d$  – диаграммы предельную температуру охлаждения воды в градирне, где вода омывается воздухом с температурой  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  и относительной влажностью  $0,4$ .

**Ответ:** теоретически воду можно охладить до температуры мокрого термометра ( $t_p=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

**10.19.** Предполагая, что вода в градирню поступает из конденсатора холодильной машины (см. условие задачи 10.18.) и ее охлаждение происходит только в результате частичного испарения, определить количество воды, которое необходимо добавить в циркуляционный контур, если в конденсаторе она нагревается на  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Расчет осуществить для  $1\text{ т}$  проходящей через градирню воды.

**Ответ:** необходимая добавка воды составит  $5\text{ кг}$

**10.20.** Как изменяется относительная влажность воздуха, если его температура понижается, а энтальпия увеличивается?

**Ответ:** относительная влажность увеличивается

**10.21.** До какой температуры можно охладить влажный воздух путем впрыскивания в него распыленной воды с температурой  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ? Начальное состояние воздуха характеризуется следующими параметрами:  $t_1=40\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $\varphi_1=30\text{ }%$ . Какое количество воды необходимо впрыскивать (из расчета на  $1\text{ кг}$  сухого воздуха), не допуская при этом образования тумана?

**Ответ:**  $W=6,2\text{ г/кг}$

**10.22.** Влажный насыщенный воздух с температурой  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  и давлением  $1000\text{ гПа}$  смешивается с воздухом, влагосодержание которого  $3\text{ г/кг}$ . Какой может быть минимальная температура второго состояния, чтобы не образовывался туман при смешении? Решить задачу, пользуясь  $h-d$  – диаграммой.

**Ответ:**  $t_2=3\text{ }^{\circ}\text{C}$

**10.23.** В камере смешения установки системы кондиционирования смешивается  $100\text{ кг}$  воздуха при температуре  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  и относительной влажности  $60\text{ }%$  и  $300\text{ кг}$

воздуха при температуре 50 °С и относительной влажности 50%. Определить параметры воздуха после смешения, если для обеих порций давление 1000 гПа. Помимо расчета решить задачу с помощью  $h-d$  – диаграммы.

<p><b>Дано:</b>  <math>M_1=100</math> кг  <math>t_1=20</math> °С  <math>\varphi_1=60\%</math>  <math>M_2=300</math> кг  <math>t_2=50</math> °С  <math>\varphi_2=50\%</math>  <math>p=1000</math> гПа</p>	<p><b>Решение:</b>  1). Энтальпия и влагосодержание 1 состояния  <math>p_{n1} = p_{n1}'' \varphi_1 = 2337 \cdot 0,6 = 1400</math> Па  <math>d_1 = 0,622 \frac{p_{n1}}{B - p_{n1}} = 0,622 \frac{1400}{10^5 - 1400} = 0,0088</math> кг/кг  <math>h_1 = t_1 + (2500 + 1,89 \cdot t_1) d_1 = 20 + (2500 + 1,89 \cdot 20) 0,0088 = 42,35</math> кДж/кг</p>
<p><math>t, \varphi, d, h-?</math></p>	<p>2). Энтальпия и влагосодержание 2 состояния  <math>p_{n2} = p_{n2}'' \varphi_2 = 12335 \cdot 0,6 = 6168</math> Па  <math>d_2 = 0,622 \frac{p_{n2}}{B - p_{n2}} = 0,622 \frac{6168}{10^5 - 6168} = 0,041</math> кг/кг  <math>h_2 = t_2 + (2500 + 1,89 \cdot t_2) d_2 = 50 + (2500 + 1,89 \cdot 50) 0,041 = 156,5</math> кДж/кг</p> <p>3). Энтальпия, влагосодержание и температура смеси  <math>d = \frac{M_1 d_1 + M_2 d_2}{M_1 + M_2} = \frac{100 \cdot 0,0088 + 300 \cdot 0,041}{100 + 300} = 0,033</math> кг/кг  <math>h = \frac{M_1 h_1 + M_2 h_2}{M_1 + M_2} = \frac{100 \cdot 42,35 + 300 \cdot 156,5}{100 + 300} = 128</math> кДж/кг</p> <p>Температуру смеси определим из уравнения  <math>h = t + (2500 + 1,89 \cdot t) d</math>  <math>t = 42,5</math> °С</p> <p>4). Решение задачи с помощью <math>h-d</math> диаграммы.  Соединив на диаграмме точки отрезком, находим на нем точку, соответствующую состоянию смеси по правилу рычага.</p>

**10.24.** К смешанному туману, имеющему одинаковые количества воды и льда и энтальпию 6,21 кДж/кг, подводится 85 кДж теплоты в расчете на 1 кг сухого воздуха. Определить температуру и относительную влажность полученного воздуха.

**Ответ:**  $t=30$  °С;  $\varphi=90$  %

**10.25.** От влажного воздуха, имеющего температуру 20 °С и относительную влажность 50%, отводится 30 кДж теплоты (в расчете на 1 кг сухого воздуха). В процессе  $d=\text{const}$ . Определить влагосодержание для всех фаз влаги в полученном влажном воздухе.

**Ответ:**  $d_{\text{п}}=3,8$  г/кг;  $d_{\text{в}}=1,6$  г/кг;  $d_{\text{л}}=2$  г/кг

**10.26.** В результате отвода 39 кДж теплоты (в расчете на 1 кг сухого воздуха) получен влажный воздух с температурой 15 °С и степенью насыщения 80%. В процессе  $d=\text{const}$ . Определить температуру и относительную влажность исходного влажного воздуха. Атмосферное давление принять равным 100 кПа.

**Ответ:**  $t_1=51$  °С;  $\varphi_1=10$  %

**10.27.** В результате подмешивания дополнительного потока влажного воздуха к основному (температура воздуха в последнем 5 °С, относительная влажность 40%, расход 30 кг/с сухого воздуха) соответствующие характеристики

объединенного потока оказываются равными 75%, 17°C, 40 кг/с. Найти температуру и влагосодержание воздуха в дополнительном потоке. Атмосферное давление считать равным 100 кПа.

**Ответ:**  $t_2=45$  °C;  $\varphi_2=45$  %;  $d_2=27,8$  г/кг

**10.28.** К влажному воздуху с температурой 25 °C и относительной влажностью 30% добавляют водяной туман с той же температурой и влагосодержанием 30 г/кг до тех пор, пока относительная влажность смеси не станет равной 80%. Найти ее температуру.

**Ответ:**  $t=19,5$  °C

**10.29.** Через воздухоохладитель пропускается воздух в количестве  $10^5$  м<sup>3</sup>/ч. Давление воздуха 986 гПа. Температура воздуха, входящего в воздухоохладитель, -2 °C и выходящего из него -8 °C. Относительная влажность воздуха, входящего в воздухоохладитель 80%. Найти количество отводимой от воздуха теплоты и количество влаги, выпадающей на холодной поверхности.

<p><b>Дано:</b>  <math>p=986</math> гПа  <math>V=10^5</math> м<sup>3</sup>/ч  <math>t_1=-2</math> °C  <math>\varphi_1=80\%</math>  <math>t_2=-8</math> °C  <hr/> <math>Q, W</math> -?</p>	<p><b>Решение:</b>            Парциальное давление, влагосодержание и энтальпия воздуха на входе в испаритель  <math>p_{n1} = p_{n1}'' \varphi_1 = 517 \cdot 0,6 = 413</math> Па  <math>d_1 = 0,622 \frac{p_{n1}}{B - p_{n1}} = 0,622 \frac{413}{98600 - 413} = 0,00261</math> кг/кг  <math>h_1 = t_1 + (2500 + 1,89 \cdot t_1) d_1 = -2 + (2500 + 1,89 \cdot (-2)) 0,00261 = 4,52</math> кДж/кг            Давление пара <math>p_{n1} = 413</math> Па соответствует температура насыщения, равная -4,7 °C.            При охлаждении воздуха ниже этой температуры из него начинает выпадать влага, а оставшийся в нем водяной пар становится сухим насыщенным.            Если полагать, что вся выпадающая влага тут же оседает на холодной поверхности, не образуя тумана, то процесс охлаждения воздуха от -4,7 °C до -8 °C можно считать идущим по линии <math>\varphi=1,0</math>.            Давление насыщенного пара при -8 °C <math>p_{n2}'' = 309,4</math> Па            Влагосодержание и энтальпия воздуха на выходе из испарителя  <math>d_2 = 0,622 \frac{p_{n2}''}{B - p_{n2}''} = 0,622 \frac{309,4}{98600 - 309,4} = 0,00196</math> кг/кг  <math>h_2'' = t_2 + (2500 + 1,89 \cdot t_2) d_2'' = -8 + (2500 + 1,89 \cdot (-8)) 0,00196</math>  <math>h_2'' = -3,13</math> кДж/кг            Парциальное давление сухого воздуха на входе в воздухоохладитель  <math>p_{r1} = B - p_{n1} = 98200</math> Па            Массовый расход сухого воздуха  <math>M_s = \frac{pV}{RT} = \frac{98200 \cdot 10^5}{287 \cdot 271} = 126500</math> кг/ч            Отводимое тепло  <math>Q = M_r (h_2'' - h_1) = 126500 (-3,13 - 4,52) = -269,44</math> кВт            Выпадающая влага</p>
---	---

$$W = M_r (d_2'' - d_1) = 126500(0,00196 - 0,00261) = -82,2 \text{ кг/ч}$$

**10.30.** От материала, помещенного в сушилку, необходимо отнять влагу (2000 кг). Температура наружного воздуха 10 °С, относительная влажность 50%. Перед сушкой воздух нагревается до 50 °С. Из сушилки он выходит с этой же температурой и относительной влажностью 90%. Какое количество воздуха необходимо пропустить через сушилку? Барометрическое давление 0,1 МПа.

**Ответ:**  $M_r = 27100 \text{ кг}$

**10.31.** В сушилку подается воздух (500 м<sup>3</sup>/ч), начальные параметры которого  $t_1 = 15 \text{ °С}$  и  $\varphi_1 = 75\%$ . Перед подачей в сушильную камеру воздух подогревается до 120 °С при постоянном давлении 1000 гПа. Определить тепловой поток, необходимый для подогрева воздуха.

**Ответ:**  $Q = 18 \text{ кВт}$

**10.32.** В камере смешения при давлении 100 кПа смешиваются 10 кг сухого воздуха, параметры которого  $t_1 = 10 \text{ °С}$ ,  $\varphi_1 = 70\%$  и 30 кг – при  $t_2 = 40 \text{ °С}$  и  $\varphi_2 = 30\%$ . Определить параметры смеси.

**Ответ:**  $d_{см} = 11,9 \text{ г/кг}$ ;  $h_{см} = 63,1 \text{ кДж/кг}$ ;  $p_{п см} = 1,88 \text{ кПа}$ ;  
 $t_{см} = 32,6 \text{ °С}$ ;  $\varphi_{см} = 38,2 \%$ ;  $\psi_{см} = 37\%$

**10.33.** От продуктов, заложенных в сушилку, необходимо отнять влагу (750 кг). Температура наружного воздуха 10 °С и относительная влажность 60%. Перед входом в сушилку воздух подогревается; на выходе из нее температура воздуха 50 °С, относительная влажность 80%. Найти объем наружного воздуха, который необходимо подать в сушилку.

**Ответ:**  $V = 10720 \text{ м}^3$

**10.34.** Для сушки продуктов используют воздух, начальные параметры которого  $t_1 = 30 \text{ °С}$  и  $\varphi_1 = 0,6$ . В калорифере он подогревается до  $t_2 = 80 \text{ °С}$  и направляется в сушилку, откуда выходит, имея температуру  $t_3 = 40 \text{ °С}$ . Определить конечное влагосодержание воздуха, расход воздуха и тепла на 1 кг отнятой от продуктов влаги.

**Ответ:**  $d_2 = d_1 = 16,3 \text{ г/кг}$ ;  $d_3 = 32,3 \text{ г/кг}$ ;  $M_r = 62,5 \text{ кг/кг}$ ;  
 $Q = 3250 \text{ кДж/кг}$

**10.35.** Определить расход воздуха и тепла в сушилке для удаления из влажного продукта влаги (500 кг/ч). Начальное состояние воздуха (до калорифера) характеризуется температурой 20 °С и относительной влажностью 70%, а конечное – соответственно 45 °С и 60%.

**Ответ:**  $M_r = 4,96 \text{ кг/кг}$ ;  $Q = 480,6 \text{ кВт}$

## Список литературы

1. Теоретические основы хладотехники. Ч. 1. Термодинамика / Под ред. Э.И. Гуйго. – М.: Колос, 1994. – 288 с.
2. Вукалович М.П., Новиков И.И. Термодинамика. – М.: Машиностроение, 1972. – 670 с.
3. Богданов С.Н., Клецкий А.В., Куприянова А.В. Задачник по термодинамическим расчетам в пищевой и холодильной промышленности. – СПб.; СПбГАХПТ, 1996. – 189 с. ISBN5-86981-013- 2.
4. Рабинович О.М. Сборник задач по технической термодинамики. – М. Машиностроение, 1973. – 334 с.
5. Сборник задач по технической термодинамики. / Т.Н. Андрианова, Б.В. Дзампов, В.Н. Зубарев, С.А. Ремизов. – М.: Энергия, 1971. – 263 с.
6. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам жидкостей и газов. – М.: Наука, 1972. – 720 с.
7. Александров А.А., Григорьев Б.Г. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. – М.: Изд-во МЭИ, 1999. – 168 с.
8. Холодильная техника. Кондиционирование. Свойства веществ. Справочник/ С.Н. Богданов, С.И. Бурцев, О.П. Иванов, А.В. Куприянова/ Под ред. С.Н. Богданова. – СПб.: СПбГАХПТ, 1999. – 320 с.
9. Бурцев С.И., Цветков Ю.Н. Влажный воздух. Состав и свойства. – СПб.: СПбГАХПТ, 1998. – 146 с.
10. Клецкий А.В. Таблицы термодинамических свойств газов и жидкостей. Выпуск 4. Аммиак. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 78 с.
11. Клецкий А.В. Таблицы термодинамических свойств газов и жидкостей. Выпуск 2. Фреон 22. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 60 с.
12. Алтунин В.В. Теплофизические свойства двуокиси углерода. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 552 с.
13. Цветков О.Б., Клецкий А.В., Лаптев Ю.А. Теплофизические свойства и диаграммы альтернативных холодильных агентов: Учебное пособие. – СПб.: СПбГАХПТ, 1997. – 96 с.
14. Tables and Diagrams for the Refrigeration Industry. Thermophysical properties R410A. – IIR, 2001. – 21 p.
15. <http://www.coolprop.org/>
16. <https://ru.smath.com/>

## **Приложения**

## Таблицы термодинамических свойств рабочих тел

- 1.1. Важнейшие характеристики некоторых рабочих тел
- 1.2. Теплоемкость некоторых газов
- 1.3. Основные характеристики хладагентов
- 1.4. Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по температурам)
- 1.5. Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по давлениям)
- 1.6. Термодинамические свойства воды и перегретого водяного пара в однофазной области
- 1.7. Термодинамические свойства аммиака (R717) на линиях кипения и конденсации (состояния насыщения)
- 1.8. Термодинамические свойства аммиака (R717) в однофазной области (перегретый пар)
- 1.9. Термодинамические свойства фреона 22 на линиях кипения и конденсации (состояния насыщения)
- 1.10. Термодинамические свойства хладагента R22 в однофазной области (перегретый пар)
- 1.11. Термодинамические свойства диоксида углерода (R744) на линиях кипения и конденсации (состояния насыщения)
- 1.12. Термодинамические свойства диоксида углерода (R744) в однофазной области (жидкость и перегретый пар)
- 1.13. Термодинамические свойства хладагента R410A на линиях кипения и конденсации (состояния насыщения)
- 1.14. Термодинамические свойства хладагента R410A в однофазной области (перегретый пар)
- 1.15. Термодинамические свойства влажного насыщенного воздуха при атмосферном давлении 0,1 МПа (750 мм рт. ст.)

## Важнейшие характеристики некоторых рабочих тел [6]

Вещество	Химическая формула	Молекулярная масса	Температура кипения при нормальных условиях, °С	Плотность при нормальных условиях, кг/м <sup>3</sup>	Газовая постоянная, Дж/(кг К)	Показатель адиабаты	Теплота парообразования при нормальном давлении, кДж/кг
Азот	N <sub>2</sub>	28,026	-195,8	1,252	296,8	1,4	197,6
Аммиак	NH <sub>3</sub>	17,032	-33,4	0,771	488,2	1,3	1373,3
Аргон	Ar	39,94	-185,9	1,785	208,5	1,68	159,6
Водяной пар*	H <sub>2</sub> O	18,02	100,0	(0,804)	(461)	1,33	2257,2
Воздух	-	28,96	-194,2	1,293	287	1,4	205
Водород	H <sub>2</sub>	2,02	-252,8	0,090	4124	1,41	445,9
Гелий	He	4,003	-268,9	0,179	2079	1,66	20,2
Диоксид углерода	CO <sub>2</sub>	44,01	-78,5	1,977	188,9	1,3	573,6
Кислород	O <sub>2</sub>	32,0	-183	1,429	259,8	1,4	212,2
Метан	CH <sub>4</sub>	16,04	-161,4	0,717	518,3	1,31	510
Окись углерода	CO	28,01	-191,5	1,250	296,8	1,4	216
Сернистый газ	SO <sub>2</sub>	64,07	-10,0	2,927	129,8	1,25	393,6
R12	CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	120,92	-29,8	5,5	68,8	1,14	165,9
R13	CF <sub>3</sub> Cl	104,47	-81,5	4,76	79,6	-	149,0
R22	CHF <sub>2</sub> Cl	86,48	-40,84	3,92	96,1	1,16	233,9
Этан	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30,07	-88,6	1,357	276,5	1,20	485,7
Этилен	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28,05	-103,7	1,251	296,4	1,25	481,5
Пропан	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44,10	-42,17	2,02	188,6	1,13	427,0

\*Приведение водяного пара к нормальному состоянию является условным

## Теплоемкость некоторых газов [6]

Температура, °С	Мольная теплоемкость, кДж/(кмоль·К)		Массовая теплоемкость, кДж/(кг·К)		Объемная теплоемкость, кДж/(м <sup>3</sup> <sub>н</sub> ·К)	
	$\mu_{ср}$	$\mu_{сv}$	$c_{pm}$	$c_{vm}$	$c'_{pm}$	$c'_{vm}$
Кислород						
0	29,274	20,959	0,9148	0,6548	1,3059	0,9349
100	29,877	21,562	0,9232	0,6632	1,3176	0,9466
200	30,815	22,500	0,9353	0,753	1,3352	0,9642
300	31,832	23,517	0,9500	0,6900	1,3561	0,9852
400	32,758	24,443	0,9651	0,7051	1,3775	1,0065
500	33,549	25,234	0,9793	0,7193	1,3980	1,0270
600	34,202	25,887	0,9927	0,7327	1,4168	1,0459
700	34,746	26,431	1,0048	0,7448	1,4344	1,0634
800	35,202	26,888	1,0157	0,7557	1,4499	1,0789
900	35,584	27,269	1,0258	0,7658	1,4645	1,0936
1000	35,914	27,599	1,0350	0,7750	1,4775	1,1066
1100	36,216	27,901	1,0434	0,7834	1,4892	1,1183
1200	36,488	28,173	1,0509	0,7913	1,5005	1,1296
1300	36,752	28,437	1,0580	0,7984	1,5106	1,1396
1400	36,999	28,684	1,0647	0,8051	1,5202	1,1493
1500	37,242	28,927	1,0714	0,8114	1,5294	1,1585
Азот						
0	29,115	20,800	1,0392	0,7423	1,2987	0,9278
100	29,199	20,884	1,0404	0,7427	1,3004	0,9295
200	29,471	21,156	1,0434	0,7465	1,3038	0,9328
300	29,952	21,637	1,0488	0,7519	1,3109	0,9399
400	30,576	22,261	1,0567	0,7599	1,3205	0,9496
500	31,250	22,935	1,0660	0,7691	1,3322	0,9613
600	31,920	23,605	1,0760	0,7792	1,3452	0,9743

Продолжение табл.2

Температура, °С	Мольная теплоемкость, кДж/(кмоль·К)		Массовая теплоемкость, кДж/(кг·К)		Объемная теплоемкость, кДж/(м <sup>3</sup> <sub>н</sub> ·К)	
	$\mu_{cp}$	$\mu_{cv}$	$c_{pm}$	$c_{vm}$	$c'_{pm}$	$c'_{vm}$
700	32,540	24,225	1,0869	0,7900	1,3586	0,9877
800	33,101	24,786	1,0974	0,8005	1,3716	1,0006
900	33,599	25,284	1,1078	0,8110	1,3845	1,0178
1000	34,039	24,724	1,1179	0,8210	1,3971	1,0178
1100	34,424	26,109	1,1271	0,8302	1,4089	1,0379
1200	34,773	26,448	1,1359	0,8395	1,4202	1,0492
1300	35,070	26,745	1,1447	0,8478	1,4306	1,0597
1400	35,330	27,005	1,1526	0,8558	1,4407	1,0697
1500	35,556	27,231	1,1602	0,8633	1,4499	1,0789
Окись углерода						
0	29,123	20,808	1,0395	0,7427	1,2992	0,9282
100	29,262	20,947	1,0417	0,7448	1,3017	0,9307
200	29,647	21,332	1,0463	0,7494	1,3071	0,932
300	30,254	21,939	1,0538	0,7570	1,3167	0,9458
400	30,974	22,659	1,0634	0,7666	1,3289	0,9579
500	31,707	23,392	1,0748	0,7775	1,3427	0,9718
600	32,402	24,087	1,0861	0,7892	1,3574	0,9864
700	33,025	24,710	1,0978	0,8009	1,3720	1,0011
800	33,574	25,259	1,1091	0,8122	1,3862	1,0153
900	34,055	25,740	1,1200	0,8231	1,3996	1,0287
1000	34,470	26,155	1,1304	0,8336	1,4126	1,0417
1100	34,826	26,511	1,1401	0,8432	1,4248	1,0538
1200	35,140	26,825	1,1493	0,8566	1,4361	1,0651
1300	35,412	27,097	1,1577	0,8608	1,4465	1,0756
1400	35,646	27,331	1,1656	0,8688	1,4566	1,0856
1500	35,856	27,541	1,1731	0,8763	1,458	1,0948

Продолжение табл.2

Температура, °С	Мольная теплоемкость, кДж/(кмоль·К)		Массовая теплоемкость, кДж/(кг·К)		Объемная теплоемкость, кДж/(м <sup>3</sup> <sub>н</sub> ·К)	
	$\mu_{Cp}$	$\mu_{Cv}$	$C_{pm}$	$C_{vm}$	$C'_{pm}$	$C'_{vm}$
Водород						
0	28,617	20,302	14,195	10,071	1,2766	0,9056
100	29,128	20,813	14,353	10,228	1,2908	0,9198
200	29,241	20,926	14,421	10,297	1,2971	0,9261
300	29,299	20,984	14,446	10,322	1,2992	0,9282
400	29,396	21,081	14,477	10,353	1,3021	0,9311
500	29,559	21,244	14,509	10,384	1,3050	0,9341
600	29,793	21,478	14,542	10,417	1,3080	0,9370
700	30,099	21,784	14,587	10,463	1,3121	0,9412
800	30,472	22,157	14,641	10,517	1,3167	0,9458
900	30,869	22,554	14,706	10,581	1,3226	0,9516
1000	31,284	22,969	14,776	10,652	1,3289	0,9579
1100	31,723	23,408	14,853	10,727	1,3360	0,9650
1200	32,155	23,840	14,934	10,809	1,3431	0,9722
1300	32,590	24,275	15,023	10,899	1,3511	0,9801
1400	33,000	24,85	15,113	10,988	1,3591	0,9881
1500	33,394	25,079	15,202	11,077	1,3674	0,9964
Диоксид углерода						
0	35,860	27,545	0,8148	0,6259	1,5998	1,228
100	40,206	31,891	0,8658	0,6770	1,7003	1,3293
200	43,689	35,374	0,9102	0,7214	1,7373	1,4164
300	46,515	38,200	0,9487	0,7599	1,8627	1,4918
400	48,860	40,515	0,9826	0,7938	1,9297	1,5587
500	50,815	42,500	1,0128	0,8240	1,9887	1,6178
600	52,452	44,137	1,0396	0,8508	2,0411	1,6701
700	53,826	45,511	1,0639	0,8746	2,0884	1,7174

Продолжение табл.2

Температура, °С	Мольная теплоемкость, кДж/(кмоль·К)		Массовая теплоемкость, кДж/(кг·К)		Объемная теплоемкость, кДж/(м <sup>3</sup> <sub>H</sub> ·К)	
	$\mu_{cp}$	$\mu_{cv}$	$c_{pm}$	$c_{vm}$	$c'_{pm}$	$c'_{vm}$
800	54,977	46,662	1,0852	0,8964	2,1311	1,7601
900	55,952	47,637	1,1045	0,9157	2,1692	1,7982
1000	56,773	48,458	1,1225	0,9332	2,2035	1,8326
1100	57,472	49,157	1,1384	0,949	2,2349	1,8640
1200	58,071	49,756	1,1530	0,9638	2,2638	1,8929
1300	58,586	50,271	1,1660	0,9772	2,2898	1,9188
1400	59,030	50,715	1,1782	0,9893	2,3136	1,9427
1500	59,411	51,096	1,1895	1,0006	2,3354	1,9644
Водяной пар						
0	33,499	25,184	1,8594	1,3980	1,4943	1,1237
100	34,055	25,740	1,8728	1,4114	1,5052	1,1342
200	34,964	26,649	1,8937	1,4323	1,5224	1,1514
300	36,036	27,721	1,9192	1,4574	1,5425	1,1715
400	37,191	28,876	1,9477	1,4863	1,5654	1,1945
500	38,406	30,091	1,9778	1,5160	1,5897	1,2188
600	39,662	31,347	2,0092	1,5474	1,6148	1,2439
700	40,951	32,636	2,0419	1,5805	1,6412	1,2703
800	42,249	33,934	2,0754	1,6140	1,6680	1,2971
900	43,513	35,198	2,1097	1,6483	1,6957	1,3247
1000	44,723	36,408	2,143	1,6823	1,7229	1,3519
1100	45,858	37,543	2,1771	1,7158	1,7501	1,3791
1200	46,913	38,598	2,2106	1,7488	1,7769	1,4059
1300	47,897	39,582	2,2449	1,7815	1,8028	1,4319
1400	48,801	40,486	2,2743	1,8129	1,8280	1,4570
1500	49,639	41,324	2,3048	1,8434	1,8527	1,4817

Окончание табл.2

Температура, °С	Мольная теплоемкость, кДж/(кмоль·К)		Массовая теплоемкость, кДж/(кг·К)		Объемная теплоемкость, кДж/(м <sup>3</sup> <sub>H</sub> ·К)	
	$\mu c_p$	$\mu c_v$	$c_{pm}$	$c_{vm}$	$c'_{pm}$	$c'_{vm}$
Воздух						
0	29,073	20,758	1,0036	0,7164	1,2971	0,9261
100	29,266	20,951	1,0061	0,7193	1,3004	0,9295
200	29,676	21,361	1,0115	0,7243	1,3071	0,9362
300	30,266	21,951	1,0191	0,7319	1,3172	0,9462
400	30,949	22,634	1,0283	0,7415	1,3289	0,9579
500	31,640	23,325	1,0377	0,7519	1,3427	0,9718
600	32,301	23,986	1,0496	0,7624	1,3565	0,9856
700	32,900	24,585	1,0605	0,7733	1,3708	0,9998
800	33,432	25,117	1,0710	0,7842	1,3842	1,0312
900	33,905	25,590	1,0815	0,7942	1,3976	1,0262
1000	34,315	26,000	1,0907	0,8039	1,4097	1,0387
1100	34,679	26,394	1,0999	0,8127	1,4214	1,0505
1200	35,002	26,687	1,1082	0,8215	1,4327	1,0618
1300	35,291	26,976	1,1166	0,8294	1,4432	1,0722
1400	35,546	27,231	1,1242	0,8369	1,4528	1,0819
1500	35,772	27,457	1,1313	0,8441	1,4620	1,0911

**Основные характеристики хладагентов [13]**

Хладагент	Химическая формула или состав смеси (% масс.)	<i>M</i> , кг/кмоль	<i>t</i> <sub>0</sub> , °C	<i>t</i> <sub>кр</sub> , °C	<i>p</i> <sub>кр</sub> , МПа	<i>ρ</i> <sub>кр</sub> , кг/м <sup>3</sup>	GWP (CO <sub>2</sub> = 1) 100 лет	ODP (R11 = 1)	θ, °C (глайд)
R12, CFC 12	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	120,91	-29,8	111,8	4,12	579,1	8500	0,9	0
R22, HCFC 22	CHClF <sub>2</sub>	86,476	-40,81	96,15	4,99	514,0	1700	0,055	0
R23, HFC 23	CHF <sub>3</sub>	-82,1	-82,1	25,9	4,87	525,0	12100	0	0
R32, HFC 32	CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	52,02	-51,7	78,2	5,80	430,0	550	0	0
R50, метан	CH <sub>4</sub>	16,043	-161,5	-82,5	4,64	163,5	24,5	0	0
R125 HFC 125	CHF <sub>2</sub> -CF <sub>3</sub>	120,022	-48,14	66,18	3,63	572,0	3400	0	0
R134a HFC 134a	CH <sub>2</sub> F-CF <sub>3</sub>	102,031	-26,17	101,06	4,06	512,2	1300	0	0
R142b HCFC 142b	CH <sub>2</sub> F-CF <sub>3</sub>	100,50	-9,8	137,2	4,12	459,0	2000	0,066	0
R143a HFC 143a	CH <sub>2</sub> F-CF <sub>3</sub>	84,04	-47,2	72,9	3,83	434,0	4300	0	0
R170 этан	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30,068	-88,84	32,318	4,872	212,0	3	0	0
R152a	CH <sub>3</sub> -CHF <sub>2</sub>	66,051	-24,023	113,26	4,5168	368,0	120	0	0

Хладагент	Химическая формула или состав смеси (% масс.)	$M$ , кг/кмоль	$t_0$ , °C	$t_{кр}$ , °C	$p_{кр}$ , МПа	$\rho_{кр}$ , кг/м <sup>3</sup>	GWP (CO <sub>2</sub> = 1) 100 лет	ODP (R11 = 1)	$\theta$ , °C (глайд)
R290 пропан	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44,0972	-42,08	96,70	4,2475	220,49	20	0	0
R1234yf 2,3,3,3-тетрафторпропен	CF <sub>3</sub> CF-CH <sub>2</sub>	114,04	-29,45	94,7	3,3822	475,55	<1	0	0
R404A	R125/134a/143a (44/4/52)	97,6	-46,60	72,14	3,74	485,0	3850	0	0,7
R407C	R32/125/134a (23/25/52)	86,20	-43,8	86,058	4,63	510,0	1620	0	5,07
R410A	R32/125 (50/50)	72,59	-51,60	71,17	4,77	486,77	1890	0	0,2
R507	R125/143a (50/50)	98,86	-47,10	70,75	3,72	481,15	3800	0	0
R600a Изобутан	CH(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	58,12	-11,94	134,7	3,64	221,00	20	20	0
Аммиак R717	NH <sub>3</sub>	17,03	-33,33	135,25	11,33	235,0	0	0	0
Вода R718	H <sub>2</sub> O	18,02	100,00	373,946	22,064	322,0	0	0	0
Диоксид углерода R744	CO <sub>2</sub>	44,011	-78,40	31,05	7,383	468,0	1	0	0

**Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по температурам) [7]**

$t_H$ , °C	$p_H$ , МПа	$v'$ , м <sup>3</sup> /кг	$v''$ , м <sup>3</sup> /кг	$h'$ , кДж/кг	$h''$ , кДж/кг	$r$ , кДж/кг	$s'$ , кДж/(кг·К)	$s''$ , Дж/(кг·К)
0,01	0,0006117	0,0010002	205,997	0	2500,9	2500,9	0	9,1555
10	0,0012282	0,0010003	106,309	42,02	2519,2	2477,2	0,1511	8,8998
20	0,0023392	0,0010018	57,761	83,92	2537,5	2453,5	0,2965	8,6661
30	0,0042467	0,0010044	32,882	125,75	2555,6	2429,8	0,4368	8,4521
40	0,0073884	0,0010079	19,517	167,54	2573,5	2406,0	0,5724	8,2557
50	0,012351	0,0010121	12,028	209,34	2591,3	2382,0	0,7038	8,0749
60	0,019946	0,0010171	7,6677	251,15	2608,8	2357,8	0,8312	7,9082
70	0,031201	0,0010228	5,0397	293,02	2626,1	2333,1	0,9550	7,7540
80	0,047415	0,0010290	3,4053	334,95	2643,0	2308,1	1,0754	7,6110
90	0,070182	0,0010359	2,3591	376,97	2659,5	2282,6	1,1927	7,4781
100	0,10142	0,0010435	1,6719	419,10	2675,6	2256,5	1,3070	7,3541
110	0,14338	0,0010516	1,2094	461,36	2691,1	2229,7	1,4187	7,2380
120	0,19867	0,0010603	0,89130	503,8	2705,9	2202,1	1,5278	7,1291
130	0,27026	0,0010697	0,66808	546,4	2720,1	2173,7	1,6346	7,0264
140	0,36150	0,0010798	0,50852	589,2	2733,4	2144,2	1,7393	6,9293
150	0,47610	0,0010905	0,39250	632,3	2745,9	2113,7	1,8420	6,8370
160	0,61814	0,0011020	0,30682	675,6	2757,4	2081,9	1,9428	6,7491
170	0,97205	0,0011143	0,24262	719,2	2767,9	2048,7	2,0419	6,6649

$t_H$ , °C	$p_H$ , МПа	$v'$ , м <sup>3</sup> /кг	$v''$ , м <sup>3</sup> /кг	$h'$ , кДж/кг	$h''$ , кДж/кг	$r$ , кДж/кг	$s'$ , кДж/(кг·К)	$s''$ , Дж/(кг·К)
180	1,0026	0,0011274	0,19386	763,21	2777,2	2014,0	2,1395	6,5841
190	1,2550	0,0011414	0,15638	807,6	2785,3	1977,7	2,2358	6,5060
200	1,5547	0,0011565	0,12722	852,4	2792,1	1939,7	2,3308	6,4303
210	1,9074	0,0011727	0,10430	897,7	2797,4	1899,6	2,4248	6,3565
220	2,3193	0,0011902	0,08610	943,6	2801,1	1857,4	2,5178	6,2842
230	2,7968	0,0012090	0,07151	990,2	2803,0	1812,8	2,6102	6,2131
240	3,3467	0,0012295	0,05971	1037,5	2803,1	1765,5	2,7019	6,1425
250	3,9759	0,0012517	0,05009	1085,7	2801,0	1715,3	2,7934	6,0722
260	4,6921	0,0012761	0,04218	1134,8	2796,6	1661,8	2,8847	6,0017
270	5,5028	0,0013030	0,03562	1185,1	2789,7	1604,6	2,9762	5,9304
280	6,4165	0,0013328	0,03015	1236,7	2779,8	1543,2	3,0681	5,8578
290	7,4416	0,0013663	0,02556	1289,8	2766,6	1476,8	3,1608	5,7832
300	8,5877	0,0014042	0,02166	1344,8	2749,6	1404,8	3,2547	5,7058
310	9,8647	0,0014479	0,01834	1402,0	2727,9	1325,9	3,3506	5,6243
320	11,284	0,0014991	0,01548	1462,1	2700,7	1238,6	3,4491	5,5373
330	12,858	0,0015606	0,01298	1525,7	2666,2	1140,5	3,5516	5,4425
340	14,600	0,0016375	0,01078	1594,4	2622,1	1027,6	3,6599	5,3359
350	16,529	0,0017401	0,008801	1670,9	2563,6	892,7	3,7783	5,2109
360	18,666	0,0018945	0,006946	1761,5	2481,0	719,5	3,9164	5,0528
370	21,043	0,0022220	0,004947	1892,7	2333,6	440,9	4,1142	4,7998
374,946	22,064	0,003106	0,003106	2087,5	2087,5	0	4,4120	4,4120

## Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по давлениям) [7]

$p_n$ , МПа	$t_n$ , °C	$v'$ , м <sup>3</sup> /кг	$v''$ , м <sup>3</sup> /кг	$h'$ , кДж/кг	$h''$ , кДж/кг	$r$ , кДж/кг	$s'$ , кДж/(кг·К)	$s''$ , кДж/(кг·К)
0,001	6,97	0,0010001	129,183	29,30	2513,7	2484,4	0,1059	8,9749
0,002	17,50	0,0010014	66,990	73,43	2532,9	2459,5	0,2606	8,7227
0,003	24,08	0,0010028	45,655	100,99	2544,9	2443,9	0,3543	8,5766
0,004	28,96	0,0010041	34,792	121,40	2553,7	2432,3	0,4224	8,4735
0,005	32,88	0,0010053	28,186	137,77	2560,8	2423,0	0,4763	8,3939
0,006	36,16	0,0010064	23,734	151,49	2566,7	2415,2	0,5209	8,3291
0,008	41,51	0,0010085	18,099	173,85	2576,2	2402,4	0,5925	8,2274
0,010	45,81	0,0010103	14,671	191,81	2583,9	2392,1	0,6492	8,1489
0,011	47,68	0,0010111	13,412	199,66	2587,2	2387,6	0,6737	8,1155
0,012	49,42	0,0010119	12,359	206,91	2590,3	2383,4	0,6963	8,0850
0,014	52,55	0,0010133	10,691	219,99	2595,8	2375,8	0,7366	8,0312
0,016	55,31	0,0010147	9,4309	231,55	2600,7	2369,1	0,7720	7,9847
0,018	57,80	0,0010160	8,4433	241,95	2605,0	2363,1	0,8035	7,9437
0,020	60,06	0,0010171	7,6482	251,40	2608,9	2357,5	0,8320	7,9072
0,025	64,96	0,0010198	6,2034	271,93	2617,4	2345,5	0,8931	7,8302
0,030	69,10	0,0010222	5,2286	289,23	2624,6	2335,3	0,9439	7,7675
0,050	81,32	0,0010299	3,2401	340,48	2645,2	2304,7	1,0910	7,5930
0,075	91,76	0,0010372	2,2171	384,37	2662,4	2278,0	1,2130	7,4557
0,10	99,61	0,0010431	1,6940	417,44	2674,9	2257,5	1,3026	7,3588
0,12	104,78	0,0010473	1,4284	439,30	2683,1	2243,8	1,3608	7,2976
0,14	109,29	0,0010510	1,2366	458,37	2690,0	2231,6	1,4109	7,2460
0,16	113,30	0,001544	1,0914	457,34	2696,0	2220,7	1,4549	7,2014
0,20	120,21	0,0010605	0,88574	504,7	2706,2	2201,6	1,5301	7,1269
0,26	128,71	0,0010685	0,69276	540,9	2718,3	2177,4	1,6210	7,0393
0,30	133,53	0,0010732	0,60579	561,5	2724,9	2163,4	1,6718	6,9916

$p_H,$ МПа	$t_H,$ °C	$v',$ м³/кг	$v'',$ м³/кг	$h',$ кДж/кг	$h'',$ кДж/кг	$r,$ кДж/кг	$s',$ кДж/(кг·К)	$s'',$ кДж/(кг·К)
0,40	143,61	0,0010836	0,46239	604,7	2738,1	2133,3	1,7766	6,8954
0,50	151,84	0,0010926	0,37480	640,2	2748,1	2107,9	1,8606	6,8206
0,60	158,83	0,0011006	0,31558	670,5	2756,1	2085,6	1,9311	6,7592
0,80	170,41	0,0011148	0,24033	721,0	2768,3	2047,3	2,0460	6,6615
1,0	179,89	0,0011272	0,19435	762,7	2777,1	2014,4	2,1384	6,5850
1,2	187,96	0,0011385	0,16325	798,5	2783,8	1985,3	2,2163	6,5217
1,4	195,05	0,0011489	0,14077	830,1	2788,9	1958,8	2,2839	6,4675
1,6	201,38	0,0011587	0,12373	858,6	2792,9	1934,3	2,3438	6,4200
1,8	207,12	0,0011679	0,11036	884,6	2796,0	1911,4	2,3978	6,3776
2,0	212,38	0,0011768	0,09958	908,6	2798,4	1889,8	2,4470	6,3392
2,5	223,96	0,0011974	0,07995	962,0	2802,0	1840,1	2,5544	6,2560
3,0	233,86	0,0012167	0,06666	1008,4	2803,3	1794,9	2,6456	6,1858
4,0	250,36	0,0012526	0,04978	1087,4	2800,9	1713,5	2,7967	6,0697
5,0	263,94	0,0012864	0,03945	1154,5	2794,2	1639,7	2,9207	5,9737
6,0	275,59	0,0013193	0,03245	1213,7	2784,6	1570,8	3,0274	5,8901
7,0	285,83	0,0013519	0,02738	1267,4	2772,6	1505,1	3,1220	5,8146
8,0	295,01	0,0013847	0,02353	1317,1	2758,6	1441,5	3,2077	5,7448
9,0	303,35	0,0014181	0,02049	1363,7	2742,9	1379,2	3,2866	5,6790
10,0	311,00	0,0014526	0,01803	1407,9	2725,5	1317,6	3,3603	5,6159
11,0	318,08	0,0014885	0,01599	1450,3	2706,4	1256,1	3,4300	5,5545
12,0	324,68	0,0015263	0,01427	1491,3	2685,6	1194,3	3,4965	5,4941
13,0	330,86	0,0015665	0,01279	1531,4	2662,9	1131,5	3,5606	5,4339
14,0	336,67	0,0016097	0,01149	1570,9	2638,1	1067,2	3,6230	5,3730
15,0	342,16	0,0016570	0,01034	1610,2	2610,9	1000,7	3,6844	5,3108
16,0	347,36	0,0017095	0,009308	1649,7	2580,8	931,1	3,7457	5,2463
18,0	356,99	0,0018395	0,007499	1732,0	2509,5	777,5	3,8717	5,1055
20,0	365,75	0,002039	0,005859	1827,1	2411,4	584,3	4,0145	4,9300
22,0	373,71	0,002750	0,003609	2021,9	2169,2	147,3	4,3109	4,5386

## Термодинамические свойства воды и перегретого водяного пара в однофазной области [7]

$t$ , °C	$p=1$ кПа ( $t_n=8,98$ °C)			$p=2$ кПа ( $t_n=17,51$ °C)			$p=3$ кПа ( $t_n=28,96$ °C)		
	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)
0	0,0010002	0	-0,0002	0,0010002	0	-0,0002	0,0010002	0	-0,0002
50	149,10	2594,4	9,2430	74,53	2594,1	8,9224	49,67	2593,9	8,7347
100	172,19	2688,5	9,5138	86,08	2688,4	9,1937	57,38	2688,3	9,0063
150	195,28	2783,4	9,0097	97,63	2783,6	9,4330	65,08	2783,5	9,2457
200	218,36	2880,0	9,9682	109,17	2880,0	9,6482	72,78	2879,9	9,4610
250	241,44	2977,7	10,1645	120,72	2977,7	9,8446	80,47	2977,7	9,6574
300	264,52	3077,0	10,3456	132,26	3076,6	10,0257	88,17	3076,9	9,8385
350	287,59	3177,7	10,5142	143,79	3177,7	10,1943	95,86	3177,7	10,0071
400	310,67	3280,1	10,6722	155,33	3280,1	10,3522	103,55	3280,0	10,1651
450	333,75	3384,1	10,8212	166,87	3384,1	10,5013	111,25	3384,1	10,3141
500	356,83	3489,8	10,9625	178,41	3489,8	10,6426	118,94	3489,7	10,4554
550	379,90	3597,2	11,0971	189,95	3597,2	10,7772	126,63	3597,2	10,5900
600	402,98	3706,3	11,2258	201,49	3706,3	10,9059	134,33	3706,3	10,7188
650	426,06	3817,3	11,3494	213,03	3817,3	11,0294	142,02	3817,3	10,8423
700	449,13	3930,0	11,4682	224,57	3930,0	11,1483	149,71	3929,9	10,9612
750	472,21	4044,4	11,5829	236,10	4044,4	11,2630	157,40	4044,4	10,0759

$t$ , °C	$p=4$ кПа ( $t_h=28,96$ °C)			$p=5$ кПа ( $t_h=32,88$ °C)			$p=6$ кПа ( $t_h=36,16$ °C)		
	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)
0	0,0010002	0	-0,0002	0,0010002	0	-0,0002	0,0010002	0	-0,0002
50	37,24	2593,6	8,6012	29,78	2593,4	8,4976	24,81	2593,1	8,8427
100	43,03	2688,2	8,8732	34,42	2688,0	8,7700	26,68	2687,9	8,6856
150	48,81	2783,4	8,1796	39,04	2783,4	9,0097	32,53	2783,3	8,9254
200	54,58	2879,9	9,3282	43,66	2879,8	9,2251	36,38	2879,8	9,1409
250	60,35	2977,6	9,5246	48,28	2977,6	9,4216	40,23	2977,6	9,3374
300	66,12	3076,9	9,7057	52,90	3076,9	9,6027	44,08	3076,8	9,5185
350	71,89	3177,7	9,8743	57,51	3177,6	9,7713	47,93	3177,6	9,6871
400	77,67	3280,0	10,0323	65,13	3280,0	9,9293	51,78	3280,0	9,8481
450	83,43	3384,0	10,1813	66,75	3384,0	10,0783	55,62	3384,0	9,9942
500	89,20	3489,7	10,3227	71,76	3489,7	10,2197	59,47	3489,7	10,1355
550	94,97	3597,2	10,4573	75,98	3597,1	10,3543	63,32	3597,1	10,2701
600	100,74	3706,3	10,5860	80,59	3706,3	10,4830	67,16	3706,3	10,3989
650	106,50	3817,2	10,7095	85,21	3817,2	10,6065	71,01	3817,2	10,5224
700	112,28	3929,9	10,8284	89,83	3929,9	10,7254	74,85	3929,9	10,6413
750	118,05	4044,4	10,9431	94,44	4044,4	10,8401	78,70	4044,4	10,7560

$t$ , °C	$p=7$ кПа ( $t_s=39,00$ °C)			$p=8$ кПа ( $t_n=41,51$ °C)			$p=9$ кПа ( $t_s=43,76$ °C)		
	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)
0	0,0010002	0	-0,0002	0,0010002	0	-0,0002	0,0010002	0	-0,0002
50	21,26	2592,8	8,3409	18,60	2592,6	8,2786	16,52	2592,3	8,2235
100	24,58	2687,8	8,6142	21,50	2687,7	8,5523	19,11	2687,6	8,4977
150	27,88	2783,2	8,8541	24,40	2783,2	8,7924	21,68	2783,1	8,7379
200	31,18	2879,7	9,0697	27,29	2879,7	9,0080	24,25	2879,6	8,9535
250	34,48	2977,5	9,2662	30,17	2977,5	9,2045	26,82	2977,5	9,1501
300	37,78	3076,8	9,4474	33,06	3076,8	9,3857	29,39	3076,8	9,3313
350	41,08	3177,6	9,6160	35,49	3177,6	9,5543	31,95	3177,6	9,4999
400	44,38	3280,0	9,7740	38,83	3280,0	9,7123	34,52	3280,0	9,6580
450	47,68	3384,0	9,9320	41,72	3384,0	9,8614	37,08	3384,0	9,8070
500	50,97	3489,7	10,0643	44,60	3489,7	10,0027	39,64	3489,7	9,9483
550	54,27	3597,1	10,1990	47,49	3597,1	10,1373	42,21	3597,1	10,0830
600	57,57	3706,3	10,3277	50,37	3706,3	10,2661	44,77	3706,3	10,2117
650	60,86	3817,2	10,4512	53,26	3817,2	10,3896	47,34	3817,2	10,3352
700	64,16	3929,9	10,5701	56,14	3929,9	10,5085	49,90	3929,9	10,4541
750	67,46	4044,7	10,6848	59,03	4044,4	10,6232	52,47	4044,4	10,5688

$t$ , °C	$p=10$ кПа ( $t_n=45,81$ °C)			$p=15$ кПа ( $t_n=53,97$ °C)			$p=20$ кПа ( $t_n=60,06$ °C)		
	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)
0	0,0010002	0	-0,0002	0,0010002	0	-0,0002	0,0010002	0	-0,0002
50	14,87	2592,0	8,1741	0,0010121	209,3	0,7038	0,0010121	209,3	0,7038
100	17,20	2687,4	8,4488	11,46	2686,8	8,2603	8,59	2686,2	8,1262
150	19,51	2783,0	8,6892	13,00	2782,7	8,8514	9,75	2782,3	8,3680
200	21,83	2879,6	8,9048	14,55	2879,4	8,7173	10,91	2879,1	8,5842
250	24,14	2977,4	9,1014	16,09	2977,3	8,9141	12,06	2977,1	8,7811
300	26,45	3076,7	9,2827	17,63	3076,6	9,0954	13,22	3076,5	8,9624
350	28,75	3177,5	9,4513	19,17	3177,4	9,2640	14,37	3177,4	9,1311
400	31,06	3279,9	9,6093	20,71	3279,9	9,4221	15,53	3279,8	9,2892
450	37,08	3384,0	9,7584	22,25	3383,9	9,5712	16,68	3383,8	9,4383
500	35,68	3489,7	9,8997	23,79	3489,6	9,7125	17,84	3489,6	9,5797
550	37,99	3597,1	10,0343	25,32	3597,1	9,8472	18,99	3597,0	9,7143
600	40,30	3706,3	10,1631	26,86	3706,2	9,9759	20,15	3706,2	9,8431
650	42,60	3817,2	10,2866	28,40	3817,2	10,0994	21,30	3817,1	9,9666
700	44,91	3929,9	10,4055	29,94	3929,9	10,2183	22,46	3929,8	10,0855
750	47,22	4044,4	10,5202	31,48	4044,4	10,3330	23,61	4044,3	10,2002

$t$ , °C	$p=30$ кПа ( $t_n=69,10$ °C)			$p=40$ кПа ( $t_n=75,86$ °C)			$p=50$ кПа ( $t_n=81,32$ °C)		
	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)
0	0,0010002	0	-0,0002	0,0010002	0	-0,0002	0,0010002	0	-0,0002
50	0,0010121	209,4	0,7038	0,0010121	209,4	0,7038	0,0010121	209,4	0,7038
100	5,715	2684,9	7,9364	4,28	2683,7	7,8009	3,419	2682,4	7,6952
150	6,494	2781,6	8,1796	4,87	2780,9	8,0455	3,890	2780,2	7,9412
200	7,268	2878,7	8,3964	5,45	2878,2	8,2629	4,356	2877,8	8,1591
250	8,040	2976,8	8,5935	6,03	2976,5	8,4602	4,821	2976,2	8,3568
300	8,811	3076,2	8,7750	6,61	3076,0	8,6419	5,284	3075,8	8,5386
350	9,582	3177,2	8,9438	7,18	3177,0	8,8108	5,747	3176,8	8,7076
400	10,352	3279,6	9,1019	7,76	3279,5	8,9690	6,209	3279,3	8,8658
450	11,122	3383,7	9,2511	8,34	3383,6	9,1182	6,672	3383,5	9,0150
500	11,892	3489,5	9,3925	8,92	3489,4	9,2596	7,134	3489,2	9,1565
550	12,661	3596,9	9,5271	9,50	3596,8	9,3943	7,596	3596,7	9,2912
600	13,431	3706,1	9,6559	10,07	3706,0	9,5231	8,058	3706,0	9,4200
650	14,200	3871,1	9,7795	10,65	3817,0	9,6466	8,520	3816,9	9,5436
700	14,970	3929,8	9,8984	11,23	3929,7	9,7655	8,981	3929,7	9,6625
750	15,739	4044,3	10,0131	11,80	4044,2	9,8803	9,443	4044,2	9,7772

$t$ , °C	$p=0,1$ МПа ( $t_h=99,61$ °C)			$p=0,2$ МПа ( $t_h=120,21$ °C)			$p=0,3$ МПа ( $t_h=133,53$ °C)		
	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)
0	0,0010002	0,1	-0,0001	0,0010001	0,2	-0,0001	0,0010001	0,3	-0,0001
50	0,0010121	209,4	0,7038	0,0010121	209,5	0,7037	0,0010120	209,6	0,7037
100	1,696	2675,8	7,3610	0,0010434	419,2	1,3069	0,0010434	419,2	1,3069
150	1,937	2776,6	7,6147	0,9599	2769,1	7,2809	0,6340	2761,2	7,0791
200	2,172	2875,5	7,8356	1,0805	2870,8	7,5081	0,7164	2866,0	7,3132
250	2,406	2974,5	8,0346	1,1989	2971,3	7,7100	0,7965	2967,9	7,5181
300	2,639	3074,5	8,2171	1,3162	3072,1	7,8940	0,8753	3069,6	7,7037
350	2,871	3175,8	8,3865	1,4330	3173,9	8,0643	0,9536	3172,0	7,8749
400	3,103	3278,5	8,5451	1,5493	3277,0	8,2235	1,0315	3275,4	8,0346
450	3,334	3382,8	8,6945	1,6655	3381,5	8,3733	1,1092	3380,2	8,1848
500	3,566	3488,7	8,8361	1,7814	3587,6	8,5151	1,1867	3486,6	8,3269
550	3,797	3596,3	8,9709	1,8973	3595,4	8,6501	1,2641	3594,5	8,4622
600	4,028	3705,6	9,0998	2,0130	3704,8	8,7792	1,3414	3704,0	8,5914
650	4,259	3816,6	9,2234	2,1287	3815,9	8,9029	1,4186	3815,3	8,7152
700	4,490	3929,4	9,3424	2,2444	3928,8	9,0220	1,4958	3928,2	8,8344
750	4,721	4043,9	9,4571	2,3600	4043,4	9,1368	1,5729	4042,9	8,9493

$t$ , °C	$p=0,5$ МПа ( $t_H=151,84$ °C)			$p=0,7$ МПа ( $t_H=164,95$ °C)			$p=1,0$ МПа ( $t_H=179,89$ °C)		
	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)
0	0,0010000	0,5	-0,0001	0,0009999	0,7	-0,0001	0,0009997	1,0	-0,0001
50	0,0010119	209,8	0,7036	0,0010118	209,9	0,7035	0,0010117	210,2	0,7033
100	0,0010433	419,4	1,3067	0,0010432	419,5	1,3065	0,0010430	419,8	1,3063
150	0,0010905	632,3	1,8419	0,0010904	632,4	1,8417	0,0010902	632,6	1,8414
200	0,4250	2855,9	7,0611	0,3000	2845,3	6,8884	0,2060	2828,3	6,6955
250	0,4744	2961,1	7,2726	0,3364	2954,1	7,1071	0,2327	3943,2	6,9266
300	0,5226	3064,6	7,4614	0,3714	3059,5	7,2995	0,2580	3051,7	7,1247
350	0,5701	3168,1	7,6345	0,4058	3164,1	7,4745	0,2825	3158,2	7,3028
400	0,6173	3272,3	7,7954	0,4398	3269,1	7,6366	0,3066	3264,4	7,4668
450	0,6642	3377,3	7,9464	0,4735	3375,1	7,7884	0,3304	3371,2	7,6198
500	0,7109	3484,4	8,0891	0,5070	3482,3	7,9317	0,3541	3479,0	7,7640
550	0,7576	3592,6	8,2247	0,5405	3590,8	8,0678	0,3777	3588,1	7,9007
600	0,8041	3702,5	8,3543	0,5738	3709,9	8,1976	0,4011	3698,6	8,0309
650	0,8506	3813,9	8,4784	0,6071	3812,6	8,3220	0,4245	3810,5	8,1557
700	0,8970	3927,0	8,5977	0,6403	3925,9	8,4415	0,4478	3924,1	8,2755
750	0,9433	4041,9	8,7128	0,6735	4040,8	8,5567	0,4711	4039,3	8,3909

$t$ , °C	$p=1,5$ МПа ( $t_H=198,30$ °C)			$p=2,0$ МПа ( $t_H=212,38$ °C)			$p=3,0$ МПа ( $t_H=233,86$ °C)		
	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)
0	0,0009994	1,5	-0,0001	0,0009992	2,0	0,0000	0,0009987	3,0	0,0000
50	0,0010115	210,6	0,7031	0,0010113	211,0	0,7029	0,0010108	211,9	0,7024
100	0,0010427	420,1	1,3059	0,0010425	420,5	1,3055	0,0010420	421,3	1,3048
150	0,0010898	632,9	1,8408	0,0010895	633,2	1,8403	0,0010888	633,8	1,8391
200	0,1324	2796,0	6,4537	0,0011561	852,6	2,3301	0,0011550	853,0	2,3285
250	0,1520	2924,0	6,7111	0,1115	2903,2	6,5474	0,07062	2856,5	6,2893
300	0,1697	3038,3	6,9199	0,1255	3024,3	6,7685	0,08118	2994,3	6,5412
350	0,1866	3148,0	7,1035	0,1386	3137,6	6,9582	0,09056	3116,1	6,7449
400	0,2030	3256,4	7,2708	0,1512	3248,2	7,1290	0,09938	3231,6	6,9233
450	0,2192	3364,7	7,4259	0,1635	3358,1	7,2863	0,1079	3344,7	7,0853
500	0,2352	3473,6	7,5716	0,1757	3468,1	7,4335	0,1162	3457,0	7,2356
550	0,2510	3583,5	7,7093	0,1877	3578,9	7,5723	0,1244	3569,6	7,3767
600	0,2668	3694,6	7,8404	0,1996	3690,7	7,7042	0,1324	3682,8	7,5102
650	0,2825	3807,2	7,9657	0,2115	3803,8	7,8301	0,1405	3797,0	7,6373
700	0,2981	3821,2	8,0860	0,22233	3918,2	7,9509	0,1484	3912,3	7,7590
750	0,3137	4036,7	8,2018	0,2350	4034,2	8,6070	0,1563	4029,0	7,8759

$t$ , °C	$p=4,0$ МПа ( $t_H=250,36$ °C)			$p=6,0$ МПа ( $t_H=275,59$ °C)			$p=8,0$ МПа ( $t_H=295,01$ °C)		
	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)
0	0,0009982	4,0	0,0001	0,0009972	6,0	0,0002	0,0009962	8,1	0,0003
50	0,0010104	212,8	0,7020	0,0010095	214,5	0,7010	0,0010086	216,2	0,7001
100	0,0010415	422,0	1,3040	0,0010405	423,5	1,3024	0,0010395	425,0	1,3009
150	0,0010881	634,4	1,8380	0,0010868	635,7	1,8358	0,0010855	639,9	1,8337
200	0,0011540	853,4	2,3269	0,0011521	854,2	2,3238	0,0011501	855,1	2,3207
250	0,0012517	1085,7	2,7933	0,0012481	1085,7	2,7885	0,0012446	1085,7	2,7837
300	0,05887	2964,7	6,3638	0,03619	2885,5	6,0702	0,02428	2786,4	5,7935
350	0,06647	3093,3	6,5843	0,04225	3043,9	6,3356	0,02998	2988,1	6,1319
400	0,07343	3214,4	6,7712	0,04742	3178,2	6,5431	0,03435	3139,3	6,3657
450	0,08004	3331,0	6,9383	0,05217	3302,8	6,7216	0,03820	3273,2	6,5577
500	0,08644	3445,8	7,0919	0,05667	3422,9	6,8824	0,04177	3399,4	6,7264
550	0,09270	3560,2	7,2353	0,06102	3541,2	7,0306	0,04517	3521,8	6,8798
600	0,09886	3684,8	7,3704	0,06526	3658,8	7,1692	0,04846	3642,4	7,0221
650	0,1049	3790,2	7,4989	0,06943	3776,4	7,3002	0,05167	3762,4	7,1557
700	0,1110	3960,4	7,6215	0,07354	3894,5	7,4248	0,05483	3882,4	7,2823
750	0,1170	4023,8	7,7391	0,07761	4013,4	7,5439	0,05793	4002,9	7,4030

$t$ , °C	$p=10,0$ МПа ( $t_n=311,00$ °C)			$p=20,0$ МПа ( $t_n=365,75$ °C)			$p=30,0$ МПа		
	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)
0	0,0009952	10,1	0,0003	0,0009904	20,0	0,0005	0,0009857	29,9	0,0003
50	0,0010078	217,9	0,6992	0,0010035	226,5	0,6946	0,0009993	235,0	0,6900
100	0,0010385	426,5	1,2994	0,0010337	434,1	1,2918	0,0010290	441,7	1,2845
150	0,0010842	638,2	1,8315	0,0010779	644,5	1,8209	0,0010720	651,0	1,8107
200	0,0011482	855,9	2,3177	0,0011390	860,4	2,3030	0,0011304	865,1	2,2890
250	0,0012421	1085,7	2,7791	0,0012254	1086,6	2,7572	0,0012113	1088,3	2,7371
300	0,0013980	1343,1	3,2484	0,0013611	1334,1	3,2087	0,0013322	1328,7	3,1756
350	0,02244	2924,0	5,9458	0,0016649	1646,0	3,7288	0,0015529	1608,8	3,6435
400	0,02644	3097,4	6,2139	0,00995	2816,8	5,5525	0,002976	2152,4	4,4750
450	0,02978	3242,3	6,4217	0,01272	3061,5	5,9041	0,006738	2820,9	5,4419
500	0,04475	3405,3	6,7620	0,01479	3241,2	6,1445	0,008690	3084,8	57956
550	0,04834	3526,7	6,9141	0,01657	3396,2	6,3390	0,010175	3279,8	6,0403
600	0,05182	3646,5	7,0555	0,01818	3539,2	6,5077	0,01144	3446,9	6,2374
650	0,05523	3765,9	7,1885	0,01969	3675,6	6,6596	0,01259	3599,7	6,4077
700	0,05857	3885,4	7,3145	0,02113	3808,2	6,7994	0,01365	3744,2	6,5602
750	0,06187	4005,5	7,4348	0,02252	3938,5	6,9301	0,01466	3883,8	6,7000

**Термодинамические свойства аммиака (R717) на линиях кипения и конденсации  
(состояния насыщения) [10]**

$t_H,$ °C	$p_H,$ МПа	$v' \cdot 10^3,$ м <sup>3</sup> /кг	$v'',$ м <sup>3</sup> /кг	$h',$ кДж/кг	$h'',$ кДж/кг	$r,$ кДж/кг	$s',$ кДж/(кг·К)	$s'',$ кДж/(кг·К)
-75	0,008774	1,368	12,853	165,72	1647,54	1481,81	0,5740	8,0523
-70	0,010920	1,379	9,0253	187,50	1656,76	1469,26	0,6826	7,9150
-65	0,015603	1,390	6,4641	209,33	1665,84	1456,51	0,7887	7,7861
-60	0,021873	1,401	4,7103	231,20	1674,74	1443,54	0,8925	7,6649
-55	0,030127	1,412	3,4916	253,13	1683,46	1430,32	0,9941	7,5507
-50	0,04082	1,424	2,6288	275,13	1691,96	1416,83	1,0938	7,4430
-45	0,054479	1,436	2,0072	297,20	1700,24	1403,03	1,1915	7,3411
-40	0,07169	1,449	1,5530	319,36	1708,26	1388,90	1,2874	7,2446
-35	0,033104	1,462	1,1662	341,59	1716,02	1374,43	1,3816	7,1529
-30	0,11945	1,475	0,9634	363,91	1723,50	1359,59	1,4742	7,0658
-25	0,15151	1,489	0,7710	386,32	1730,67	1344,35	1,5653	6,9828
-20	0,19014	1,504	0,6230	408,83	1737,53	1328,70	1,6548	6,9035
-15	0,23625	1,518	0,5081	431,45	1744,06	1312,61	1,7431	6,8277
-10	0,29083	1,534	0,4179	454,18	1750,25	1296,07	1,8299	6,7552
-5	0,35491	1,550	0,3463	477,02	1756,07	1279,05	1,9156	6,6855
0	0,42957	1,566	0,2890	500,00	1761,52	1261,52	2,0000	6,6185
5	0,51597	1,583	0,2428	523,12	1766,58	1243,46	2,0834	6,5539
10	0,61531	1,601	0,2052	546,4	1771,2	1224,8	2,1658	6,4915

$t_H$ , °C	$p_H$ , МПа	$v' \cdot 10^3$ , м <sup>3</sup> /кг	$v''$ , м <sup>3</sup> /кг	$h'$ , кДж/кг	$h''$ , кДж/кг	$r$ , кДж/кг	$s'$ , кДж/(кг·К)	$s''$ , кДж/(кг·К)
15	0,72881	1,619	0,1745	569,84	1775,45	1205,61	2,2472	6,4312
20	0,85777	1,639	0,1491	593,46	1779,22	1185,76	2,3278	6,3727
25	1,0035	1,659	0,1280	617,28	1782,51	1165,23	2,4075	6,3157
30	1,1675	1,680	0,1104	641,33	1785,30	1143,97	2,4866	6,2602
35	1,3510	1,702	0,09569	665,61	1787,55	1121,94	2,5650	6,2059
40	1,5555	1,726	0,08313	690,16	1789,23	1099,07	2,6429	6,1526
45	1,7826	1,751	0,07250	715,01	1790,29	1075,28	2,7204	6,1002
50	2,0337	1,777	0,06341	740,17	1790,68	1050,51	2,7975	6,0483
55	2,3106	1,804	0,05560	765,69	1790,35	1024,66	2,8743	5,9969
60	2,6147	1,834	0,04888	791,61	1789,22	997,62	2,9510	5,9455
65	2,9478	1,866	0,04303	817,96	1787,22	969,26	3,0277	5,8941
70	3,3117	1,900	0,03794	844,79	1784,24	939,45	3,1045	5,8422
75	3,7081	1,937	0,03349	872,17	1780,18	908,01	3,1815	5,7896
80	4,1390	1,977	0,02957	900,17	1774,89	874,73	3,2589	5,7358
90	5,1125	2,071	0,02305	958,41	1759,91	801,50	3,4160	5,6231
100	6,2497	2,189	0,01786	1020,65	1737,28	716,63	3,5785	5,4990
110	7,5715	2,349	0,01362	1089,13	1703,34	614,21	3,7516	5,3547
120	9,1042	2,594	0,01000	1169,40	1649,62	480,21	3,9486	5,1701
130	10,888	3,176	0,00636	1288,89	1537,06	248,17	4,2357	4,8512

**Термодинамические свойства аммиака (R717) в однофазной области (перегретый пар) [10]**

$t$ , °C	$p=0,01092$ МПа ( $t_n = -70$ °C)			$p=0,02187$ МПа ( $t_n = -60$ °C)			$p=0,04082$ МПа ( $t_n = -50$ °C)		
	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)
-60	9,4787	1677,04	8,0124	–	–	–	–	–	–
-50	9,9404	1697,33	8,1055	4,9407	1695,38	7,7595	–	–	–
-45	10,1636	1707,49	8,1505	5,0556	1705,69	7,8052	2,391	1702,5	7,490
-40	10,3896	1717,66	8,1946	5,1706	1715,99	7,8499	2,754	1713,1	7,536
-35	10,6157	1727,85	8,2378	5,2826	1726,30	7,8052	2,878	1734,1	7,624
-25	11,0668	1748,26	8,3218	5,5127	1746,93	7,8499	2,940	1744,6	7,667
-15	11,5168	1768,76	8,4027	5,7372	1767,61	7,8936	3,063	1765,6	7,750
-5	11,9674	1789,35	8,4810	5,9630	1788,35	7,9785	3,186	1786,6	7,829
0	12,1921	1799,69	8,5192	6,0753	1798,75	8,1774	3,247	1797,1	7,866
10	12,6406	1820,45	8,5938	6,3012	1819,63	8,2525	3,368	1818,2	7,944
20	13,0907	1841,33	8,6663	6,5274	1840,61	8,3253	3,490	1839,4	8,017
30	13,5391	1862,35	8,7368	6,7522	1861,71	8,3961	3,611	1860,6	8,089
40	13,9880	1883,52	8,8055	6,9784	1882,94	8,4650	3,733	1882,0	8,158
50	14,4363	1904,83	8,8725	7,1994	1904,32	8,5322	3,854	1903,4	8,226
60	–	–	–	–	–	–	3,973	1925,0	8,291
70	–	–	–	–	–	–	4,093	1946,8	8,356

$t$ , °C	$p=0,07169$ МПа ( $t_n = -40$ °C)			$p=0,1194$ МПа ( $t_n = -30$ °C)			$p=0,1901$ МПа ( $t_n = -20$ °C)		
	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)
-35	1,590	1719,2	7,291	–	–	–	–	–	–
-30	1,626	1730,0	7,336	–	–	–	–	–	–
-25	1,662	1740,8	7,380	0,986	1734,8	7,112	–	–	–
-15	1,734	1762,3	7,465	1,030	1757,2	7,200	0,638	1749,3	6,950
-10	–	–	–	–	–	–	0,652	1761,0	6,994
-5	1,805	1738,8	7,546	1,074	1779,3	7,284	0,667	1772,5	7,038
0	1,840	1794,5	7,586	1,096	1790,3	7,325	0,681	1784,0	7,080
10	1,910	1815,9	7,663	1,139	1812,2	7,404	0,709	1806,7	7,162
20	1,980	1837,3	7,737	1,182	1834,1	7,480	0,736	1829,3	7,240
30	2,050	1858,8	7,809	1,224	1855,9	7,553	0,764	1851,7	7,315
40	2,120	1880,3	7,879	1,267	1877,8	7,624	0,790	1873,0	7,388
50	2,189	1902,0	7,947	1,309	1899,7	7,693	0,818	1896,3	7,458
60	2,258	1923,7	8,014	1,351	1921,7	7,760	0,844	1918,6	7,526
70	2,327	1945,6	8,078	1,392	1943,7	7,825	0,871	1941,0	7,592
80	2,396	1967,6	8,141	1,434	1965,9	7,889	0,898	1963,4	7,656
90	2,464	1989,8	8,203	1,476	1988,2	7,951	0,923	1985,8	7,719
100	–	–	–	1,517	2010,7	8,012	0,950	2008,6	7,781
110	–	–	–	1,559	2033,3	8,072	0,976	2031,3	7,841

Продолжение табл. 8

$t$ , °C	$p=0,2908$ МПа ( $t_n = -10$ °C)			$p=0,355$ МПа ( $t_n = 0$ °C)			$p=0,4981$ МПа ( $t_n = 10$ °C)		
	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)
-5	0,428	1762,6	6,802	–	–	–	–	–	–
0	0,438	1774,8	6,847	–	–	–	–	–	–
5	0,447	1786,8	6,890	0,296	1714,5	6,666	–	–	–
10	0,457	1798,7	6,933	0,303	1787,3	6,711	–	–	–
15	0,466	1810,5	6,974	0,310	1799,9	6,755	0,210	1785,0	6,540
20	0,476	1822,2	7,014	0,316	1812,3	6,798	0,215	1798,5	6,586
30	0,494	1845,5	7,092	0,329	1836,8	6,880	0,225	1824,7	6,674
40	0,512	1868,5	7,167	0,342	1860,8	6,958	0,235	1850,2	6,757
50	0,530	1891,4	7,239	0,355	1884,6	7,033	0,244	1875,1	6,835
60	0,548	1914,2	7,309	0,367	1908,1	7,104	0,253	1899,7	6,910
70	0,566	1937,0	7,376	0,380	1931,5	7,174	0,262	1923,9	6,982
80	0,583	1959,8	7,442	0,392	1954,8	7,240	0,271	1947,9	7,051
90	0,601	1982,6	7,505	0,404	1978,0	7,306	0,279	1971,8	7,117
100	0,618	2005,5	7,567	0,416	2001,3	7,369	0,288	1995,6	7,182
110	0,636	2028,5	7,628	0,428	2024,7	7,430	0,296	2019,4	7,245
120	0,653	2051,6	7,688	0,440	2048,0	7,491	0,305	2043,2	7,306
135	–	–	–	–	–	–	0,317	1079,0	7,396
150	–	–	–	–	–	–	0,330	2114,9	7,482

$t$ , °C	$p=0,8578$ МПа ( $t_H=20$ °C)			$p=1,1675$ МПа ( $t_H=30$ °C)			$p=1,5555$ МПа ( $t_H=40$ °C)		
	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)
25	0,153	1793,8	6,422	–	–	–	–	–	–
30	0,157	1808,1	6,470	–	–	–	–	–	–
35	0,160	1822,0	6,515	0,113	1800,9	6,311	–	–	–
40	0,164	1835,7	6,559	0,116	1816,1	6,360	–	–	–
45	0,168	1849,1	6,602	0,119	1830,8	6,407	0,0856	1806,0	6,206
50	0,171	1862,4	6,643	0,122	1845,2	6,452	0,0879	1822,2	6,256
60	0,178	1888,3	6,722	0,128	1873,2	6,537	0,0924	1853,1	6,351
70	0,185	1913,7	6,797	0,133	1900,3	6,617	0,0967	1882,6	6,438
80	0,191	1938,8	6,869	0,138	1926,7	6,693	0,101	1910,9	6,519
90	0,198	1963,5	6,938	0,143	1952,6	6,765	0,105	1938,4	6,596
100	0,204	1988,1	7,005	0,148	1978,1	6,835	0,109	1965,3	6,669
110	0,210	2012,5	7,069	0,152	2003,4	6,902	0,112	1991,7	6,739
120	0,217	2036,8	7,132	0,157	2028,4	6,966	0,116	2017,7	6,806
135	0,226	2073,2	7,223	0,164	2065,8	7,059	0,122	2056,3	6,902
145	0,232	2097,6	7,282	–	–	–	–	–	–
150	–	–	–	0,171	2103,1	7,149	0,127	2094,6	6,994
160	0,241	2134,1	7,368	–	–	–	–	–	–
165	–	–	–	0,178	2140,3	7,235	1,132	2132,6	7,083

$t$ , °C	$p=1,7826$ МПа ( $t_H=45$ °C)			$p=2,0337$ МПа ( $t_H=50$ °C)			$p=2,6147$ МПа ( $t_H=60$ °C)		
	$\nu$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$\nu$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$\nu$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)
50	0,0747	1807,7	6,155	–	–	–	–	–	–
55	0,0769	1824,5	6,206	0,0654	1808,8	6,104	–	–	–
60	0,0789	1840,7	6,255	0,0674	1826,2	6,157	–	–	–
65	0,0809	1856,4	6,302	0,0692	1843,0	6,207	0,0506	1809,0	6,005
70	0,0828	1871,7	6,347	0,0710	1859,2	6,254	0,0522	1827,9	6,060
80	0,0866	1901,3	6,432	0,0745	1890,3	6,344	0,0553	1863,2	6,162
90	0,0902	1929,9	6,512	0,0778	1920,1	6,427	0,0581	1896,3	6,254
100	0,0936	1957,6	6,587	0,0810	1948,8	6,505	0,0609	1927,6	6,339
110	0,0971	1984,7	6,659	0,0840	1976,8	6,579	0,0634	1957,7	6,418
120	0,100	2011,3	6,727	0,0870	2004,1	6,649	–	–	–
135	0,105	2050,7	6,825	0,0914	2044,3	6,750	–	–	–
150	0,111	2089,5	6,919	0,0956	2083,8	6,845	–	–	–
165	0,115	2128,1	7,008	0,0998	2123,0	6,936	–	–	–

**Термодинамические свойства фреона 22 на линиях кипения и конденсации (состояния насыщения) [11]**

$t_H$ , °C	$p_H$ , МПа	$\rho'$ , м <sup>3</sup> /кг	$\rho''$ , м <sup>3</sup> /кг	$h'$ , кДж/кг	$h''$ , кДж/кг	$r$ , кДж/кг	$s'$ , кДж/(кг·К)	$s''$ , кДж/(кг·К)
-110	0,000729	1595	0,04655	379,0	654,0	275,0	0,4366	2,1226
-100	0,001990	1569	0,1198	389,7	658,8	269,1	0,5003	2,0547
-90	0,004779	1543	0,2726	400,4	663,7	263,3	0,5604	1,9979
-80	0,01033	1517	0,5603	411,1	668,5	257,4	0,6173	1,9501
-70	0,02042	1490	1,058	421,9	673,4	251,5	0,6716	1,9098
-60	0,03747	1463	1,863	432,7	678,7	245,5	0,7236	1,8755
-50	0,06453	1435	3,092	443,6	683,0	239,4	0,7735	1,8463
-40	0,1053	1406	4,884	454,6	687,6	233,0	0,8216	1,8211
-30	0,1640	1377	7,398	465,7	692,2	226,5	0,8681	1,7994
-20	0,2455	1347	1082	477,0	696,5	219,5	0,9132	1,7803
-10	0,3550	1318	14,85	488,4	700,6	212,2	0,9571	1,7635
0	0,4981	1282	21,28	500,0	704,4	204,4	1,0000	1,7484
10	0,6809	1248	28,87	511,8	707,9	196,1	1,0420	1,7346
20	0,9097	1211	38,53	523,9	711,0	187,1	1,0834	1,7216
30	1,1913	1172	50,76	536,4	713,7	177,3	1,1244	1,7091
40	1,5327	1130	66,25	549,3	715,7	166,4	1,1653	1,6966
50	1,9418	1083	86,02	562,8	716,9	154,1	1,2067	1,6835
60	2,4267	1031	111,7	577,2	717,1	139,9	1,2492	1,6690
70	2,997	970,2	146,3	592,85	715,68	122,83	1,2936	1,6516
80	3,6640	894,1	196,2	610,46	711,55	101,09	1,3422	1,6284
90	4,4424	780,3	283,1	632,44	701,17	68,73	1,4009	1,5902

**Термодинамические свойства хладагента R22 в однофазной области  
(перегретый пар) [11]**

$t$ , °C	$p=0,0103$ МПа ( $t_n = -80$ °C)			$p=0,0204$ МПа ( $t_n = -70$ °C)			$p=0,03747$ МПа ( $t_n = -60$ °C)		
	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)
-70	1,880	673,90	1,9773	–	–	–	–	–	–
-60	1,975	679,37	2,0035	0,994	678,95	1,9365	–	–	–
-55	–	–	–	–	–	–	0,5504	681,10	1,8889
-50	2,069	684,94	2,0291	1,042	684,59	1,9624	0,5637	683,98	1,9020
-45	–	–	–	–	–	–	0,5770	686,88	1,9140
-40	2,164	690,63	2,0540	1,090	690,33	1,9875	0,5903	689,81	1,9275
-35	–	–	–	–	–	–	0,6039	692,75	1,9400
-30	2,257	696,44	2,0784	1,138	696,17	2,0121	0,6161	695,72	1,9523
-25	–	–	–	–	–	–	0,6301	698,71	1,9645
-20	2,351	702,36	2,1023	1,186	702,13	2,0361	0,6435	701,73	1,9765
-10	–	–	–	–	–	–	0,6698	707,85	2,0002
0	–	–	–	–	–	–	0,6959	714,07	2,0234

$t$ , °C	$p=0,06453$ МПа ( $t_H=-50$ °C)			$p=0,1053$ МПа ( $t_H=-40$ °C)			$p=0,164$ МПа ( $t_H=-30$ °C)		
	$\nu$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$\nu$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$\nu$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)
-45	0,3314	685,97	1,8596	–	–	–	–	–	–
-40	0,3394	688,96	1,8725	–	–	–	–	–	–
-35	0,3473	691,97	1,8853	0,2099	690,75	1,8344	–	–	–
-30	0,3552	694,99	1,8978	0,2149	693,86	1,8473	–	–	–
-25	0,3631	698,03	1,9102	0,2299	696,98	1,8600	0,1386	695,40	1,8127
-20	0,3709	701,09	1,9224	0,2148	700,11	1,8725	0,1419	698,64	1,8256
-15	0,3786	704,17	1,9345	0,2297	703,25	1,8848	0,1452	701,88	1,8383
-10	0,3864	707,28	1,9464	0,2346	706,41	1,8969	0,1485	705,12	1,8507
-5	0,3942	710,41	1,9582	0,2395	709,59	1,9089	0,1517	708,38	1,8630
0	0,4019	713,56	1,9698	0,2443	712,79	1,9207	0,1549	711,65	1,8751
5	–	–	–	0,2491	716,01	1,9324	0,1581	714,93	1,8870
10	0,4172	719,94	1,9928	0,2539	719,25	1,9439	0,1613	718,23	1,8987
20	0,4325	726,42	2,0152	0,2635	725,80	1,9667	0,1675	724,88	1,9218
30	0,4478	733,01	2,0373	0,2730	732,44	1,9889	0,1738	731,61	1,9444
40	–	–	–	0,2822	739,18	2,0108	0,1799	738,42	1,9664
50	–	–	–	0,2947	746,01	2,0323	0,1860	745,32	1,9881
60	–	–	–	–	–	–	0,1922	752,31	2,0094

$t$ , °C	$p=0,2455$ МПа ( $t_H=-20$ °C)			$p=0,355$ МПа ( $t_H=-10$ °C)			$p=0,4981$ МПа ( $t_H=0$ °C)		
	$\nu$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$\nu$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$\nu$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)
-15	0,09479	699,88	1,7937	–	–	–	–	–	–
-10	0,09709	703,26	1,8067	–	–	–	–	–	–
-5	0,09940	706,64	1,8194	0,06680	704,16	1,7770	–	–	–
0	0,1016	710,01	1,8318	0,06849	707,69	1,7909	–	–	–
5	0,1038	713,39	1,8441	0,07013	711,22	1,8021	–	–	–
10	0,1060	716,77	1,8562	0,07174	714,73	1,8154	0,04953	711,90	1,7754
15	0,1082	720,17	1,8681	0,07331	718,25	1,8277	0,05076	715,59	1,7883
20	0,1104	723,58	1,8798	0,07491	721,76	1,8398	0,05198	719,26	1,8009
25	0,1125	726,99	1,8913	0,07645	725,27	1,8517	0,05316	722,92	1,8133
30	0,1147	730,43	1,9028	0,07800	728,80	1,8634	0,05432	726,57	1,8254
35	–	–	–	–	–	–	0,05546	730,22	1,8374
40	0,1189	737,34	1,9252	0,08104	735,87	1,8863	0,05659	733,87	1,8491
45	–	–	–	–	–	–	0,05774	737,52	1,8607
50	0,1231	744,34	1,9472	0,08403	742,99	1,9087	0,05886	741,17	1,8721
60	0,1273	751,40	1,9687	0,08703	750,17	1,9306	0,06105	748,51	1,8944
70	0,1314	753,56	1,9899	0,08993	757,42	1,9520	0,06321	755,89	1,9163
80	–	–	–	0,09285	764,74	1,9731	0,06536	763,33	1,9376

$t$ , °C	$p=0,6809$ МПа ( $t_n = 10$ °C)			$p=0,9097$ МПа ( $t_n = 20$ °C)			$p=1,1913$ МПа ( $t_n = 30$ °C)		
	$\nu$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$\nu$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$\nu$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)
15	0,0364	711,91	1,7486	–	–	–	–	–	–
20	0,03662	715,83	1,7621	–	–	–	–	–	–
25	0,3755	719,71	1,7752	0,02676	715,28	1,7361	–	–	–
30	0,03849	723,55	1,7880	0,02754	719,43	1,7499	–	–	–
35	0,03940	727,37	1,8005	0,02830	723,52	1,7633	0,02037	718,22	1,7241
40	0,04029	731,18	1,8127	0,02903	727,57	1,7763	0,02102	722,65	1,7384
45	0,04117	734,97	1,8248	0,02975	731,57	1,7890	0,02164	726,99	1,7521
50	0,04203	738,75	1,8366	0,03045	735,55	1,8014	0,02224	731,26	1,7653
55	–	–	–	0,03114	739,50	1,8135	0,02282	735,47	1,7783
60	0,04372	746,32	1,8596	0,03182	743,43	1,8254	0,02339	739,64	1,7910
65	–	–	–	0,03249	747,35	1,8331	0,02395	743,76	1,8033
70	0,04539	753,89	1,8820	0,03314	751,27	1,8486	0,02449	747,86	1,8153
80	0,04704	761,49	1,9038	0,03444	759,09	1,8710	0,02555	756,01	1,8387
90	0,04864	769,13	1,9252	0,03570	766,92	1,8929	0,02658	764,10	1,8613
100	–	–	–	0,03694	774,78	1,9143	0,02758	772,18	1,8833
110	–	–	–	–	–	–	0,02856	780,27	1,9046

$t$ , °C	$p=1,5327$ МПа ( $t_h = 40$ °C)			$p=1,7283$ МПа ( $t_h = 45$ °C)			$p=1,9418$ МПа ( $t_h = 50$ °C)		
	$\nu$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$\nu$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$\nu$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)
45	0,01568	720,64	1,7124	–	–	–	–	–	–
50	0,01623	725,41	1,7273	0,01379	721,61	1,7065	–	–	–
55	0,01675	730,05	1,7415	0,01431	726,56	1,7217	0,01215	722,40	1,7004
60	0,01726	734,58	1,7552	0,01480	731,39	1,7363	0,01263	727,60	1,7161
65	0,01774	739,03	1,7685	0,01526	736,08	1,7502	0,01309	732,60	1,7310
70	0,01821	743,41	1,7813	0,01571	740,66	1,7637	0,01352	737,45	1,7453
75	0,01867	747,74	1,7939	0,01614	745,16	1,7767	0,01394	742,17	1,7589
80	0,01912	752,02	1,8061	0,01656	749,59	1,7894	0,01434	746,81	1,7721
85	0,01956	756,27	1,8180	0,01697	753,98	1,8017	0,01472	751,36	1,7850
90	0,01999	760,50	1,8297	0,01737	758,33	1,8137	0,01510	755,85	1,7974
100	0,02082	768,89	1,8526	0,01814	766,92	1,8371	0,01583	764,70	1,8214
110	0,02164	777,24	1,8746	0,01889	775,44	1,8596	0,01652	773,42	1,8445
120	0,02243	785,57	1,8961	0,01962	783,91	1,8814	0,01719	782,06	1,8668
130	–	–	–	–	–	–	0,01784	790,65	1,8883

$t$ , °C	$p=2,1742$ ( $t_h = 55$ °C)			$p=2,4627$ МПа ( $t_h = 60$ °C)			$p=2,9971$ МПа ( $t_h = 70$ °C)		
	$\nu$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$\nu$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$\nu$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)
60	0,01071	722,98	1,6941	–	–	–	–	–	–
65	0,01117	728,44	1,7104	–	–	–	–	–	–
70	0,01160	733,66	1,7257	0,00988	729,09	1,7045	–	–	–
75	0,01201	738,69	1,7403	0,01029	734,55	1,7203	0,00724	723,08	1,6731
80	0,1239	743,57	1,7542	0,01068	739,78	1,7353	0,00775	729,66	1,6919
85	0,01277	748,35	1,7676	0,01104	744,85	1,7495	0,00812	735,74	1,7090
90	0,01312	753,03	1,7806	0,01139	749,77	1,7631	0,00847	741,48	1,7248
100	0,01381	762,19	1,8055	0,01205	759,32	1,7891	0,00911	752,23	1,7541
110	0,01446	771,15	1,8292	0,01266	768,58	1,8136	0,00969	762,36	1,7809
120	0,01509	779,98	1,8520	0,01325	777,66	1,8370	0,01022	772,09	1,8059
130	0,01569	788,74	1,8740	0,01382	786,61	1,8505	0,01073	781,57	1,8297
140	–	–	–	0,01436	795,49	1,8812	0,01121	790,87	1,8525

**Термодинамические свойства диоксида углерода (R744)  
на линиях кипения и конденсации (состояния насыщения) [12]**

$T_n$ , К	$p_n$ , МПа	$\rho'$ , кг/м <sup>3</sup>	$\rho''$ , кг/м <sup>3</sup>	$h'$ , кДж/кг	$h''$ , кДж/кг	$r$ , кДж/кг	$s'$ , кДж/(кг·К)	$s''$ , кДж/(кг·К)
218	0,554	1173,7	14,69	388,9	732,9	344,0	2,667	4,245
220	0,601	1166,7	15,88	392,6	733,7	341,1	2,683	4,234
230	0,892	1129,8	23,26	411,0	736,9	325,9	2,762	4,179
240	1,282	1089,5	33,29	430,2	739,0	308,8	2,842	4,128
250	1,785	1045,9	46,64	450,6	739,8	289,2	2,923	4,080
260	2,418	998,1	64,36	472,0	738,9	266,8	3,006	4,032
270	3,201	944,2	88,21	494,9	735,7	240,8	3,090	3,982
280	4,157	882,5	121,53	519,7	729,1	209,5	3,177	3,925
290	5,316	803,9	172,15	547,9	716,7	168,8	3,272	3,854
300	6,714	680,9	271,55	585,4	689,0	103,6	3,392	3,737
303	7,187	611,1	343,42	603,4	668,7	65,3	3,450	3,665

**Термодинамические свойства диоксида углерода (R744) в однофазной области  
(жидкость и перегретый пар) [12]**

$T$ , К	$p=0,1$ МПа			$p=0,2$ МПа			$p=0,4$ МПа		
	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)
220	2,44	744,7	4,609	4,95	742,7	4,471	10,21	738,4	4,326
230	2,33	752,6	4,642	4,72	750,8	4,506	9,68	747,1	4,363
240	2,23	760,5	4,675	4,50	759,0	4,540	9,21	755,7	4,399
250	2,14	768,5	4,708	4,31	767,1	4,547	8,79	764,3	4,435
260	2,05	776,6	4,741	4,14	775,4	4,607	8,41	772,8	4,469
270	1,98	784,8	4,773	3,98	783,7	4,639	8,07	781,3	4,502
280	1,90	793,1	4,804	3,83	792,0	4,670	7,76	789,9	4,534
290	1,84	801,5	4,833	3,69	800,5	4,700	7,47	798,5	4,564
300	1,77	809,9	4,862	3,56	809,0	4,729	7,20	807,1	4,594
310	1,72	818,5	4,890	3,45	817,6	4,757	6,96	815,9	4,622
320	1,66	827,2	4,917	3,34	826,4	4,784	6,72	824,7	4,650
330	1,61	835,9	4,944	3,23	835,2	4,811	6,51	833,6	4,677
340	1,56	844,8	4,970	3,13	844,1	4,837	6,31	842,6	4,703
350	1,52	853,7	4,995	3,04	853,0	4,863	6,12	851,7	4,729
360	1,47	862,7	5,020	2,96	862,1	4,888	5,95	860,8	4,755
370	1,43	871,9	5,045	2,88	871,3	4,913	5,78	870,0	4,780

$T$ , К	$p=0,6$ МПа			$p=0,8$ МПа			$p=1,0$ МПа		
	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)
220	15,85	733,7	4,234	1167,1	392,6	2,682	1167,5	392,7	2,682
230	14,93	743,2	4,274	20,54	739,0	4,206	1130,1	411,0	2,762
240	14,15	752,3	4,313	19,35	748,7	4,247	24,86	744,9	4,193
250	13,46	761,3	4,350	18,33	758,1	4,286	23,44	754,8	4,235
260	12,84	770,1	4,385	17,44	767,3	4,323	22,22	764,4	4,273
270	12,29	778,9	4,419	16,65	776,4	4,358	21,15	773,8	4,309
280	11,79	787,6	4,452	15,94	785,4	4,392	20,21	783,0	4,344
290	11,33	796,4	4,483	15,30	794,3	4,423	19,36	792,2	4,376
300	10,92	805,3	4,513	14,71	803,3	4,454	18,59	801,4	4,407
310	10,53	814,1	4,452	14,17	812,3	4,483	17,89	810,5	4,437
320	10,17	823,1	4,570	13,68	821,4	4,512	17,24	819,7	4,466
330	9,84	832,1	4,597	13,22	830,5	4,539	16,65	828,9	4,494
340	9,53	841,2	4,624	12,79	839,7	4,566	16,10	838,2	4,521
350	9,24	850,3	4,650	12,39	848,9	4,593	15,59	847,5	4,548
360	8,97	859,5	4,675	12,02	858,2	4,618	15,11	856,9	4,574
370	8,71	868,8	4,701	11,67	867,6	4,644	14,66	866,4	4,599

$T$ , К	$p=2,0$ МПа			$p=3,0$ МПа			$p=4,0$ МПа		
	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)
220	1169,6	393,0	2,679	1171,7	393,3	2,677	1173,7	393,6	2,674
230	1132,7	411,2	2,759	1135,3	411,4	2,756	1137,8	411,6	2,753
240	1091,9	430,3	2,839	1095,2	430,3	2,836	1098,4	430,4	2,832
250	1046,8	450,5	2,922	1051,0	450,4	2,918	1055,1	450,3	2,914
260	49,91	747,7	4,094	1001,5	471,8	3,003	1007,0	471,4	2,998
270	46,54	759,3	4,139	79,79	740,5	4,008	951,2	494,2	3,084
280	43,79	770,2	4,179	72,82	754,7	4,061	113,09	733,5	3,946
290	41,47	780,7	4,217	67,60	767,5	4,106	100,51	751,1	4,007
300	39,45	791,0	4,251	63,43	779,3	4,146	92,02	765,7	4,057
310	37,68	801,0	4,284	59,94	790,5	4,183	85,58	778,8	4,100
320	36,09	810,9	4,315	56,95	801,4	4,217	80,39	791,0	4,138
330	34,67	820,8	4,345	54,34	812,1	4,249	76,05	802,8	4,174
340	33,37	830,6	4,374	52,03	822,6	4,280	72,32	814,1	4,207
350	32,19	840,4	4,402	49,95	833,0	4,310	69,06	825,2	4,239
360	31,10	850,2	4,429	48,07	843,3	4,339	66,17	836,1	4,270
370	30,09	860,1	4,456	46,36	853,6	4,366	63,57	846,9	4,299

$T$ , К	$p=5,0$ МПа			$p=10,0$ МПа			$p=15,0$ МПа		
	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)
220	1175,7	393,9	2,672	1185,1	395,5	2,660	-	-	-
230	1140,3	411,8	2,750	1151,9	413,0	2,736	1162,6	414,5	2,724
240	1101,5	430,5	2,829	1115,8	431,2	2,813	1128,7	432,2	2,799
250	1059,1	450,3	2,910	1076,9	450,3	2,892	1092,4	450,8	2,875
260	1012,2	471,1	2,993	1035,0	470,3	2,971	1054,0	470,1	2,952
270	958,7	493,5	3,078	989,3	491,1	3,050	1013,1	490,1	3,028
280	893,1	518,3	3,169	938,1	513,1	3,131	969,1	510,7	3,104
290	148,6	727,8	3,899	878,2	537,0	3,215	920,8	532,2	3,179
300	128,47	748,8	3,970	802,1	564,1	3,307	866,4	555,0	3,257
310	126,21	765,2	4,023	686,7	599,5	3,423	803,4	579,6	3,337
320	107,31	779,5	4,068	449,7	664,9	3,630	728,0	607,0	3,424
330	100,33	792,6	4,108	310,5	717,2	3,791	637,0	638,3	3,519
340	94,60	805,0	4,145	258,7	746,0	3,876	537,1	672,6	3,622
350	89,74	817,0	4,179	228,9	767,3	3,937	450,2	705,7	3,717
360	85,53	828,6	4,212	208,4	785,3	3,988	387,5	733,8	3,796
370	81,82	840,0	4,243	193,0	801,4	4,031	343,7	757,4	3,860

**Термодинамические свойства хладагента R410A на линиях кипения и конденсации  
(состояния насыщения) [14]**

$p_H$ , МПа	$t'_H$ , °C	$t''_H$ , °C	$v' \cdot 10^3$ , м <sup>3</sup> /кг	$v'' \cdot 10^3$ , м <sup>3</sup> /кг	$h'$ , кДж/кг	$h''$ , кДж/кг	$s'$ , кДж/(кг·К)	$s''$ , кДж/(кг·К)
0,10	-51,86	-54,81	0,7398	242,561	126,489	398,204	0,7043	1,9321
0,20	-37,16	-37,11	0,7666	126,029	146,566	405,686	0,7918	1,8897
0,30	-27,49	-27,42	0,7861	85,576	160,060	410,244	0,8476	1,8658
0,40	-20,06	-19,99	0,8025	64,832	170,590	413,498	0,8895	1,8491
0,50	-13,95	-13,87	0,8169	52,153	179,388	415,994	0,9235	1,8362
0,60	-8,71	-8,62	0,8300	43,574	187,035	417,985	0,9524	1,8256
0,70	-4,10	-4,01	0,8424	37,370	193,857	419,611	0,9777	1,8166
0,80	0,04	0,13	0,8540	32,668	200,054	420,958	1,0002	1,8087
0,90	3,80	3,89	0,8652	28,977	205,760	422,082	1,0206	1,8016
1,00	7,25	7,35	0,8761	25,999	211,070	423,024	1,0394	1,7951
1,10	10,46	10,56	0,8866	23,544	216,052	423,811	1,0567	1,7892
1,20	13,45	13,56	0,8970	21,484	220,759	424,466	1,0729	1,7836
1,30	16,26	16,37	0,9072	19,729	225,232	425,005	1,0881	1,7783
1,40	18,91	19,02	0,9173	18,215	229,502	425,439	1,1025	1,7733
1,50	21,42	21,54	0,9274	16,896	233,596	425,780	1,1162	1,7685
1,60	23,81	23,93	0,9374	15,734	237,536	426,036	1,1292	1,7638
1,70	26,09	26,20	0,9474	14,704	241,339	426,212	1,1416	1,7593
1,80	28,27	28,38	0,9574	13,783	245,021	426,315	1,1535	1,7549

$p_H$ , МПа	$t'_H$ , °C	$t''_H$ , °C	$\nu' \cdot 10^3$ , м <sup>3</sup> /кг	$\nu'' \cdot 10^3$ , м <sup>3</sup> /кг	$h'$ , кДж/кг	$h''$ , кДж/кг	$s'$ , кДж/(кг·К)	$s''$ , кДж/(кг·К)
1,90	30,36	30,47	0,9675	12,955	248,595	426,347	1,1650	1,7506
2,00	32,37	32,48	0,9777	12,205	252,072	426,314	1,1761	1,7464
2,10	34,30	34,42	0,9879	11,523	255,463	426,216	1,1869	1,7422
2,20	36,16	36,28	0,9983	10,900	258,776	426,057	1,1973	1,7380
2,30	37,97	38,08	1,0089	10,327	262,019	425,838	1,2074	1,7339
2,40	39,71	39,82	1,0196	9,800	265,199	425,560	1,2173	1,7298
2,50	41,40	41,51	1,0305	9,311	268,324	425,223	1,2269	1,7257
2,60	43,03	43,15	1,0417	8,858	271,398	424,827	1,2364	1,7215
2,70	44,62	44,73	1,0531	8,435	274,428	424,373	1,2456	1,7174
2,80	46,16	46,27	1,0648	8,040	277,420	423,859	1,2546	1,7132
2,90	47,67	47,78	1,0768	7,669	280,378	423,284	1,2636	1,7089
3,00	49,13	49,24	1,0893	7,320	283,307	422,647	1,2723	1,7046
3,10	50,55	50,66	1,1021	6,991	286,213	421,945	1,2810	1,7002
3,20	51,94	52,04	1,1154	6,680	289,100	421,175	1,2895	1,6958
3,30	53,30	53,40	1,1292	6,385	291,975	420,334	1,2980	1,6912
3,40	54,62	54,72	1,1436	6,104	294,841	419,417	1,3064	1,6865
3,50	55,91	56,01	1,1587	5,836	297,707	418,418	1,3148	1,6816
3,60	57,17	57,26	1,1746	5,579	300,577	417,331	1,3232	1,6766
3,70	58,41	58,50	1,1913	5,332	303,459	416,147	1,3315	1,6713
3,80	59,61	59,70	1,2091	5,095	306,362	414,855	1,3399	1,6659
3,90	60,79	60,88	1,2281	4,865	309,295	413,443	1,3483	1,6602

## Термодинамические свойства хладагента R410A в однофазной области (перегретый пар) [14]

$t$ , °C	$p = 0,1759$ МПа			$p = 0,2702$ МПа			$p = 0,3998$ МПа		
	$v \cdot 10^3$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$v \cdot 10^3$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$v \cdot 10^3$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)
-35	146,341	408,472	1,9153	–	–	–	–	–	–
-30	150,197	412,603	1,9325	–	–	–	–	–	–
-25	153,979	416,689	1,94,91	97,310	413,518	1,8901	–	–	–
-20	157,701	420,750	1,9653	99,944	417,870	1,9074	–	–	–
-15	–	–	–	–	–	–	66,819	418,225	1,8676
-10	165,008	428,848	1,9967	105,037	426,405	1,9405	68,702	422,823	1,8853
-5	–	–	–	–	–	–	70,532	427,334	1,9023
0	172,176	436,963	2,0270	109,966	434,842	1,9720	72,318	431,789	1,9187
10	179,240	445,133	2,0563	114,777	443,264	2,0023	75,793	440,601	1,9504
20	186,222	453,382	2,0850	119,501	451,716	2,0316	79,167	449,359	1,9808
30	193,139	461,728	2,1130	124,155	460,229	2,0602	82,465	458,120	2,0102
40	200,005	470,184	2,1404	128,754	468,825	2,0880	85,702	466,920	2,0388
50	206,828	478,758	2,1673	133,309	477,518	2,1154	88,892	475,784	2,0666
60	213,616	487,459	2,1939	137,827	486,320	2,1422	92,043	484,732	2,0939
70	–	–	–	142,390	495,392	2,1690	95,167	493,930	2,1210
80	–	–	–	–	–	–	98,254	502,930	2,1469

$t$ , °C	$p = 0,5724$ МПа			$p = 0,7967$ МПа			$p = 1,0820$ МПа		
	$\nu$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$\nu$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$\nu$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)
-5	47,116	422,522	1,8473	–	–	–	–	–	–
0	48,519	427,398	1,8654	–	–	–	–	–	–
5	49,874	432,162	1,8826	33,948	426,327	1,8286	–	–	–
10	51,192	436,848	1,8993	35,033	431,524	1,8471	–	–	–
15	–	–	–	36,075	436,575	1,8648	24,881	429,533	1,8107
20	53,740	446,078	1,9314	37,083	441,524	1,8818	25,752	435,109	1,8299
25	–	–	–	–	–	–	26,582	440,497	1,8481
30	56,199	155,207	1,9620	39,020	451,221	1,9143	27,379	445,748	1,8656
40	58,591	464,305	1,9915	40,876	460,763	1,9453	28,900	455,977	1,8988
50	60,930	473,417	2,0202	42,671	470,232	1,9751	30,345	465,979	1,9302
60	63,226	482,572	2,0481	44,418	479,683	2,0039	31,733	475,858	1,9603
70	65,559	491,955	2,0759	46,155	489,315	2,0323	33,100	485,848	1,9899
80	67,722	501,099	2,1021	47,804	498,671	2,0592	34,387	495,495	2,0176
90	69,931	510,500	2,1283	49,456	508,255	2,0860	35,668	505,331	2,0450
100	–	–	–	51,086	517,920	2,1122	36,925	515,214	2,0719
110	–	–	–	–	–	–	38,162	525,162	2,0982

$t$ , °C	$p = 1,4383$ МПа			$p = 1,8769$ МПа			$p = 2,4104$ МПа		
	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)
25	18,470	431,997	1,7931	–	–	–	–	–	–
30	19,195	438,041	1,8132	–	–	–	–	–	–
35	19,878	443,832	1,8322	13,826	433,526	1,7751	–	–	–
40	20,259	449,439	1,8502	14,452	440,173	1,7965	–	–	–
45	–	–	–	15,033	446,464	1,8164	10,386	433,839	1,7557
50	21,759	460,281	1,8843	15,581	452,502	1,8352	10,948	441,307	1,7790
55	–	–	–	–	–	–	11,459	448,244	1,8003
60	22,916	470,804	1,9164	16,604	464,065	1,8705	11,934	454,819	1,8202
70	24,020	481,141	1,9469	17,555	475,184	1,9034	12,807	467,248	1,8569
80	25,083	391,374	1,9763	18,455	486,034	1,9345	13,067	479,058	1,8909
90	26,112	501,562	2,0048	19,314	496,722	1,9644	14,356	190,490	1,9228
100	21,116	511,743	2,0324	20,143	507,320	1,9932	15,067	501,685	1,9532
110	28,097	521,948	2,0594	20,947	517,877	2,0211	15,747	512,734	1,9824
120	29,060	532,199	2,0858	21,731	528,429	2,0483	16,405	523,700	2,0107
130	–	–	–	22,497	539,005	2,0748	17,042	534,630	2,0381
140	–	–	–	–	–	–	17,664	545,555	2,0649

$t$ , °C	$p=3,0535$ МПа			$p=3,4218$ МПа			$p=3,8253$ МПа		
	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)
55	7,780	432,501	1,7337	–	–	–	–	–	–
60	8,308	441,170	1,7599	6,708	431,003	1,7211	–	–	–
65	8,773	448,983	1,7832	7,230	440,509	1,7494	5,758	428,782	1,7070
70	9,197	456,247	1,8045	7,680	448,885	1,7740	6,282	439,371	1,7381
75	–	–	–	8,084	456,572	1,7963	6,721	448,424	1,7643
80	9,960	469,736	1,8433	–	–	–	7,109	456,601	1,7876
85				8,803	470,684	1,8362	–	–	–
90	10,647	482,358	1,8785				7,789	471,410	1,8290
95	–	–	–	9,444	483,767	1,8723	–	–	–
100	11,282	494,455	1,9114	–	–	–	8,390	484,996	1,8659
105				10,033	496,232	1,9057	–	–	–
110	11,880	506,217	1,9425	–	–	–	8,937	497,858	1,8999
115	–	–	–	10,585	508,306	1,9372	–	–	–
120	12,449	517,766	1,9722	–	–	–	9,448	510,261	1,9319
130	12,995	529,181	2,0009	–	–	–	9,930	522,365	1,9623
140	13,523	540,519	2,0287	–	–	–	10,390	534,272	1,9915
150	14,036	551,820	2,0557	–	–	–	10,833	546,055	2,0196
160	–	–	–	–	–	–	11,261	557,763	2,0470

**Термодинамические свойства влажного насыщенного воздуха  
при атмосферном давлении 0,1 МПа (750 мм рт. ст.) [9]**

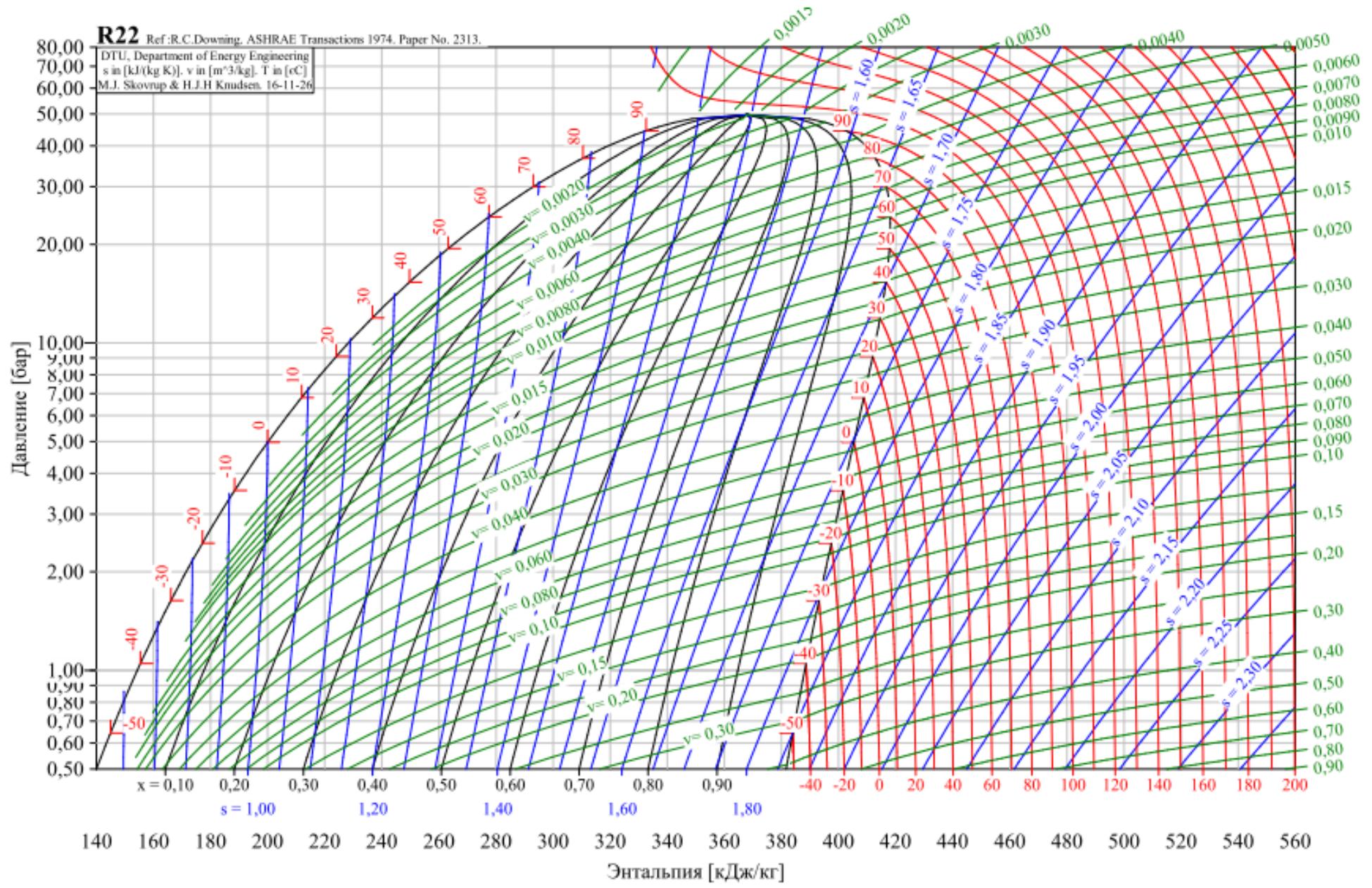
$t$ , °С	$p_{в.п}''$ , Па	$d''$ , г/кг с.в	$C_{p_{в.в}}''$ , кДж/(кг·К)	$h_{в.в}''$ , кДж/кг	$\rho_{в.в}''$ , кг/м <sup>3</sup>
-50	3,866	0,02405	1,0061	-50,24	1,562
-40	12,399	0,07713	1,0061	-40,05	1,495
-30	37,330	0,2323	1,0064	-29,61	1,434
-20	102,925	0,6408	1,0072	-18,54	1,377
-10	259,445	1,618	1,0090	-6,04	1,324
0	610,8	3,823	1,0131	9,56	1,273
10	1227,1	7,727	1,0205	29,53	1,225
20	2336,8	14,883	1,0339	57,90	1,179
30	4241,7	27,552	1,0586	100,64	1,131
40	7374,9	49,524	1,0999	167,82	1,082
50	12335	87,519	1,1711	277,40	1,028
60	19919	154,714	1,2966	464,70	0,967
70	31161	281,558	1,5343	811,52	0,896
80	47359	559,588	2,0545	1563,83	0,810
90	70108	1458,824	3,7359	3984,72	0,705
95	84525	3397,390	7,3621	9196,16	0,644

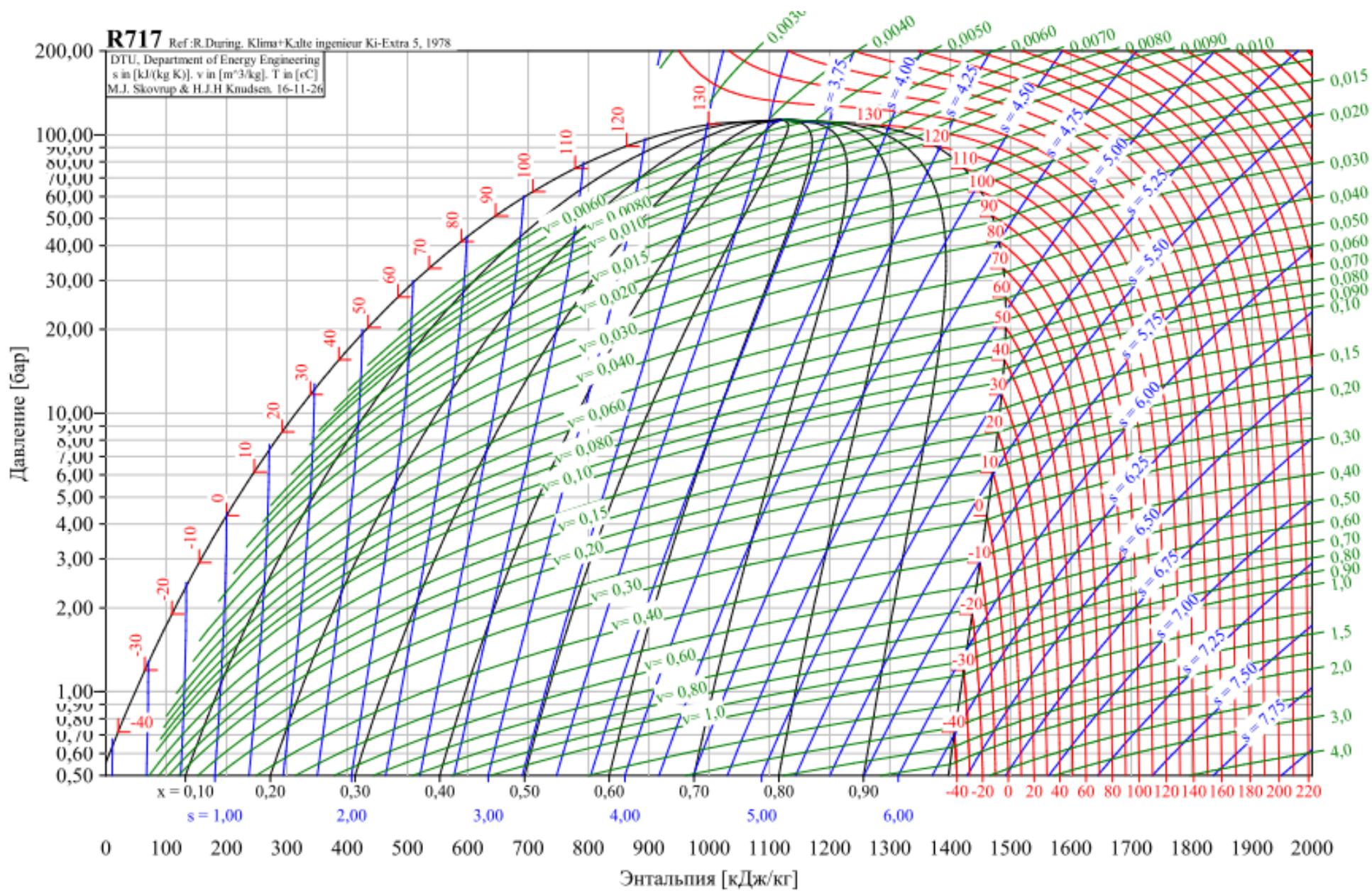
## Диаграммы

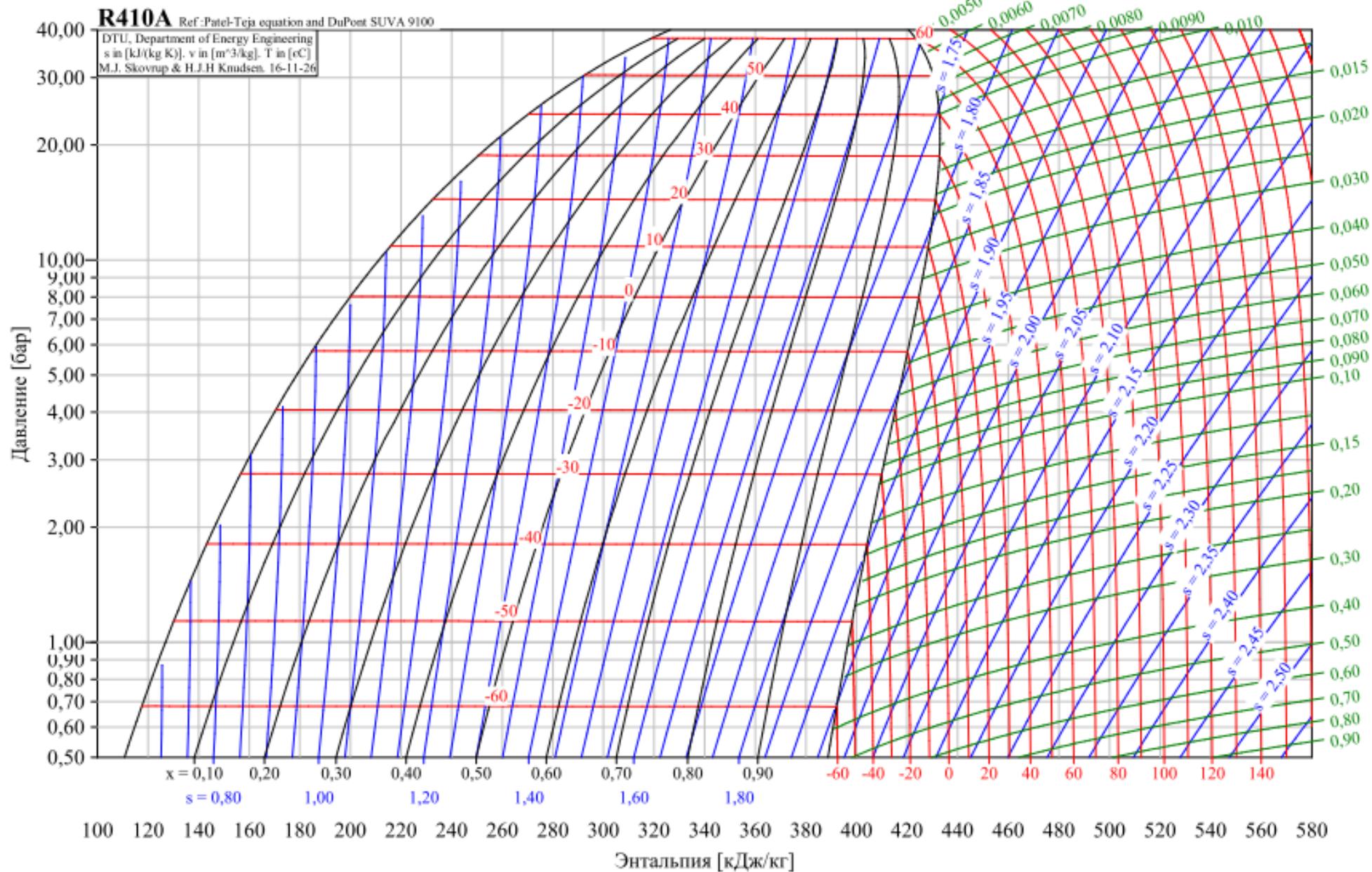
- 2.1.  $h$ -lg  $p$  – диаграмма хладагента R22.
- 2.2.  $h$ -lg  $p$  – диаграмма хладагента R717.
- 2.3.  $h$ -lg  $p$  – диаграмма хладагента R404A.
- 2.4.  $h$ -lg  $p$  – диаграмма хладагента R410A.
- 2.5.  $h$ -lg  $p$  – диаграмма хладагента R744.
- 2.6.  $T$ -s – диаграмма R718

**R22** Ref: R.C. Downing, ASHRAE Transactions 1974, Paper No. 2313.

DTU, Department of Energy Engineering  
s in [kJ/(kg K)], v in [m<sup>3</sup>/kg], T in [°C]  
M.J. Skovrup & H.J.H. Knudsen, 16-11-26

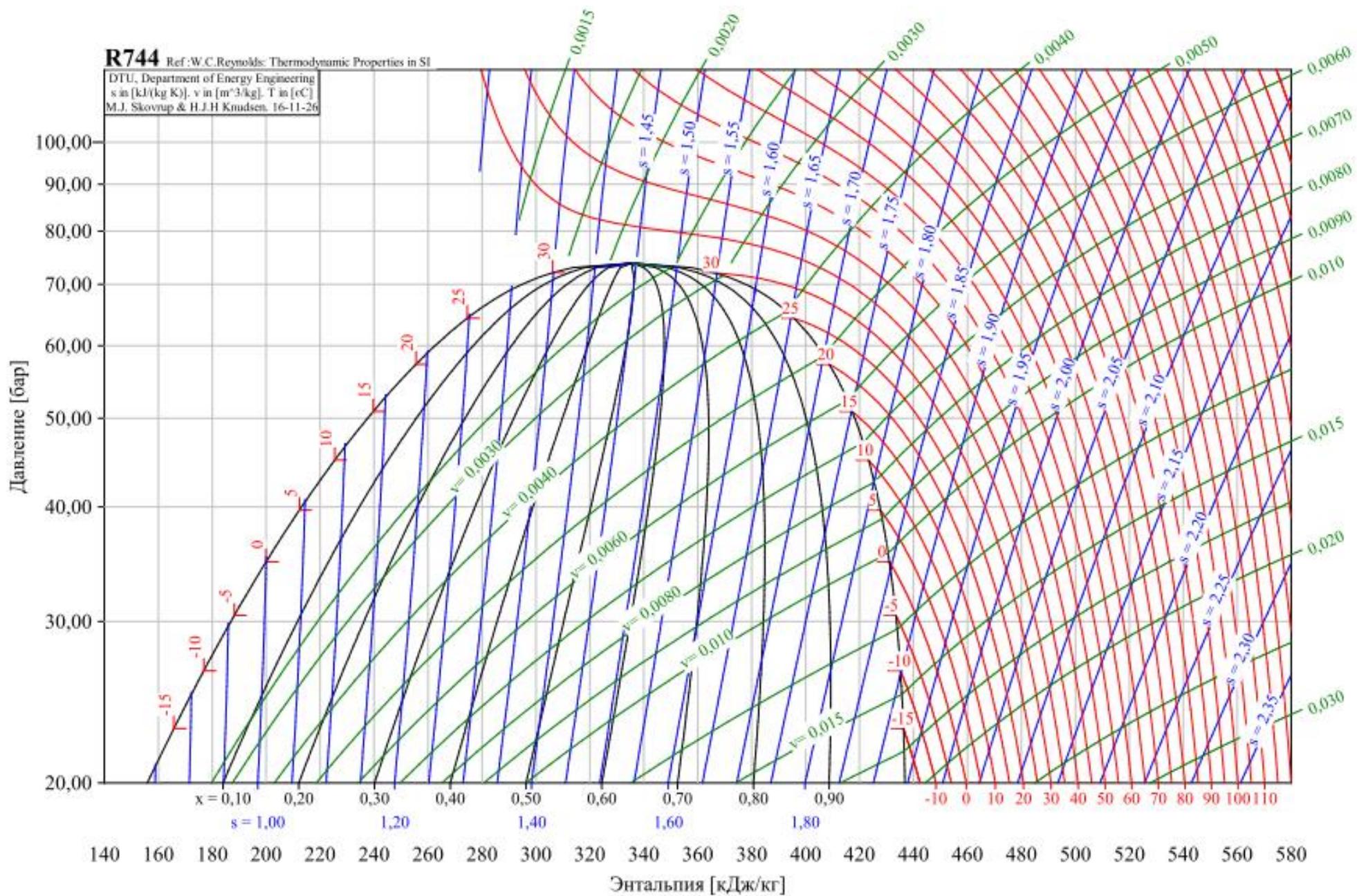






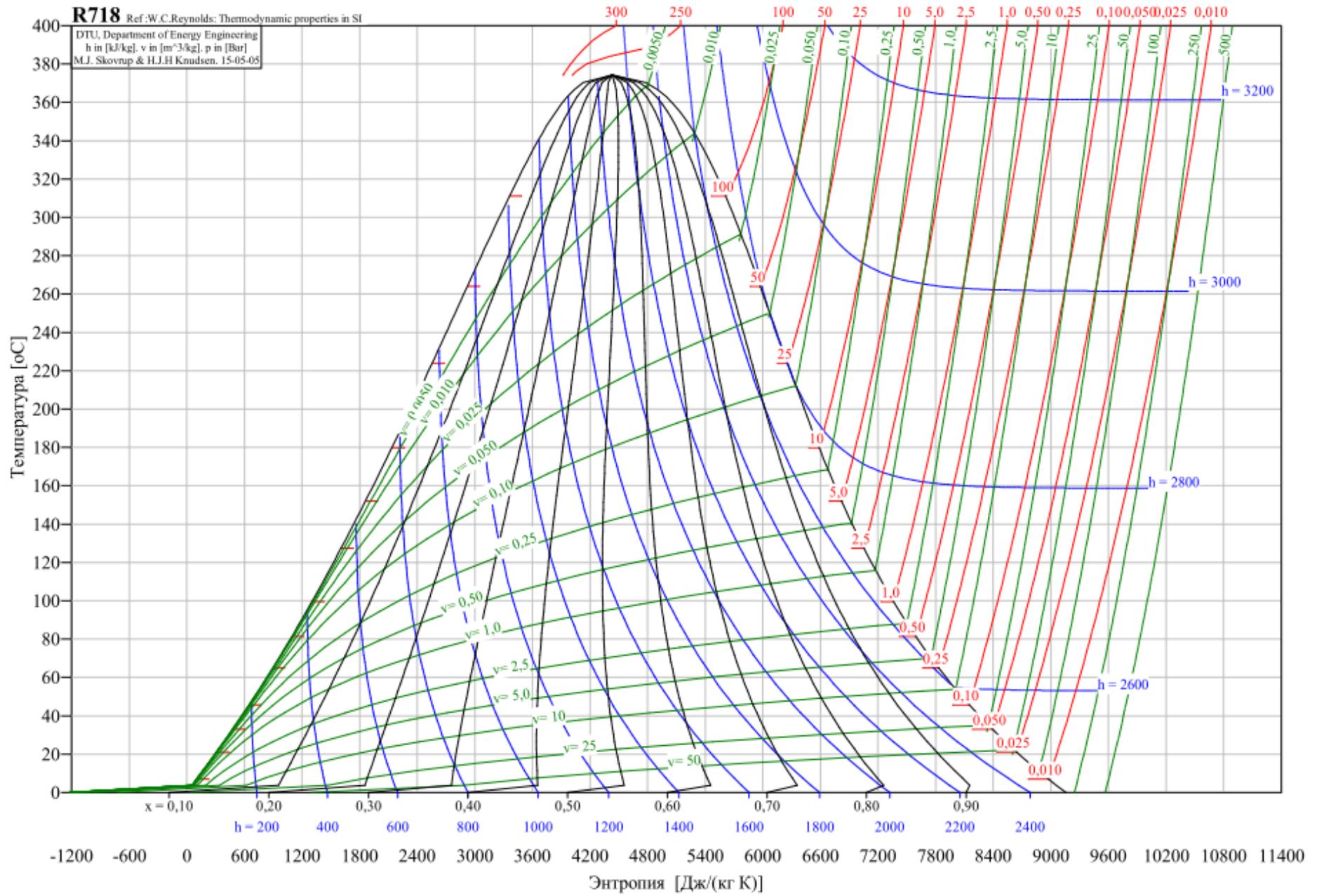
**R744** Ref: W.C.Reynolds: Thermodynamic Properties in SI

DTU, Department of Energy Engineering  
 $s$  in [kJ/(kg K)],  $v$  in [m<sup>3</sup>/kg],  $T$  in [°C]  
M.J. Skovrup & H.J.H. Knudsen, 16-11-26



**R718** Ref: W.C.Reynolds: Thermodynamic properties in SI

DTU, Department of Energy Engineering  
h in [kJ/kg], v in [m<sup>3</sup>/kg], p in [Bar]  
M.J. Skovrup & H.J.H Knudsen, 15-05-05



## Пример использования библиотеки CoolProp в пакете математических вычислений Smath Studio

### Версия библиотеки CoolProp

```
CoolProp_get_global_param_string("version")="6.1.0"
```

### Получение общей информации о веществе

```
HA := CoolProp_get_fluid_param_string("Ethane";
    ["aliases"
     "CAS"
     "ASHRAE34"
     "REFPROPName"])

HA = ["ethane, ETHANE, R170"
      "74-84-0"
      "A3"
      "ETHANE"]
```

### Перечень всех поддерживаемых чистых и псевдо-чистых веществ

```
Name1 := strsplit(CoolProp_get_global_param_string("fluids_list"); ",")
```

```
Name1 = ["1-Butene"
         "Acetone"
         "Air"
         "Ammonia"
         "Argon"
         "Benzene"
         "CarbonDioxide"
         "CarbonMonoxide"
         "CarbonylSulfide"
         "cis-2-Butene"
         "CycloHexane"
         "Cyclopentane"
         "CycloPropane"
         "D4"
         "D5"
         "D6"
         "Deuterium"
         ⋮]
```

### Перечень всех predefined смесей

```
Name2 := strsplit(CoolProp_get_global_param_string("predefined_mixtures"); ",")
```

```
Name2 = ["Air.mix"
         "Amarillo.mix"
         "Ekofisk.mix"
         "GulfCoast.mix"
         "GulfCoastGas(NIST1).mix"
         "HighCO2.mix"
         "HighN2.mix"
         "NaturalGasSample.mix"
         "R401A.mix"
         "R401B.mix"
         "R401C.mix"
         "R402A.mix"
         "R402B.mix"
         "R403A.mix"
         "R403B.mix"
         "R404A.mix"
         "R405A.mix"
         ⋮]
```

### Свойства определенной смеси

```
mix := "HEOS::Nitrogen[0.7812]&Oxygen[0.2096]&Argon[0.0092]" = 6,826  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг К}}$   
CoolProp_Props("S"; "P"; 1 атм; "T"; 15 °C; mix)
```

### Константы вещества

```
CoolProp_Props1("Oxygen"; "Tcrit")=154,581 K
```

### Определение фазы вещества

```
CoolProp_Phase("T"; 20 °C; "P"; 1 атм; "Benzene")="liquid"
```

```
CoolProp_Phase("T"; 20 °C; "P"; 1 атм; "Ammonia")="gas"
```

```
CoolProp_Phase("T"; (-5) °C; "P"; 1 атм; "Water")="" Just FYI :) Filed upstream as #1098
```

### Определение параметра вещества

```
CoolProp_Props("H"; "T"; 20 °C; "P"; 1 атм; "Water")=84,0073  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ 
```

### Попытка использовать недопустимый параметр

```
CoolProp_Props("Invalid"; "T"; 20 °C; "P"; 1 атм; "Water")=■
```

### Получение последней строки ошибки

```
CoolProp_get_global_param_string("errstring")=""
```

### Выполнение вычисления, которое задает предупреждение

```
CoolProp_Props("V"; "T"; 0 °C; "P"; 1 атм; "Air.mix")=1,7164·10-5 с Па
```

### Получение последней строки предупреждения

```
CoolProp_get_global_param_string("warnstring")="Mixture model for viscosity is highly approximate"
```

### Перечень параметров влажного воздуха

```
HAProps := stack ( 

|          |        |            |           |         |                |
|----------|--------|------------|-----------|---------|----------------|
| "Omega"  | "Y"    | "DewPoint" | "H"       | "C"     | "Vda"          |
| "HumRat" | "Z"    | "D"        | "Hda"     | "cp"    | "Vha"          |
| "W"      | "Tdb"  | "Twb"      | "Hha"     | "Cha"   | "mu"           |
| "RH"     | "T_db" | "T_wb"     | "Entropy" | "cp_ha" | "Visc"         |
| "RelHum" | "T"    | "WetBulb"  | "S"       | "P"     | "M"            |
| "R"      | "Tdp"  | "B"        | "Sda"     | "P_w"   | "k"            |
| "psi_w"  | "T_dp" | "Enthalpy" | "Sha"     | "V"     | "Conductivity" |
|          |        |            |           |         | "K"            |

 )
```

### Параметры влажного воздуха при

t=20 оC, p=1 атм, отн влажности 50%

```
valsHA := CoolProp_HAProps(HAProps; "T"; 20 °C; "P"; 1 атм; "R"; 0,5)
```

"Omega"	0,0073
"HumRat"	0,0073
"W"	0,0073
"RH"	0,5
"RelHum"	0,5
"R"	0,5
"psi_w"	0,0116
"Y"	0,0116
"Z"	0,9996
"Tdb"	293,15 K
"T_db"	293,15 K
"T"	293,15 K
"Tdp"	282,4244 K
"T_dp"	282,4244 K
"DewPoint"	282,4244 K
"D"	282,4244 K
"Twb"	286,9265 K
"T_wb"	286,9265 K
"WetBulb"	286,9265 K
"B"	286,9265 K

augment(*HAProps*; *vals<sub>HA</sub>*) =

"Enthalpy"	38622,8389	$\frac{\text{M}}{\text{c}}^2$
"H"	38622,8389	$\frac{\text{M}}{\text{c}}^2$
"Hda"	38622,8389	$\frac{\text{M}}{\text{c}}^2$
"Hha"	38343,1754	$\frac{\text{M}}{\text{c}}^2$
"Entropy"	139,9702	$\frac{\text{M}}{\text{K c}}^2$
"S"	139,9702	$\frac{\text{M}}{\text{K c}}^2$
"Sda"	139,9702	$\frac{\text{M}}{\text{K c}}^2$
"Sha"	138,9567	$\frac{\text{M}}{\text{K c}}^2$
"C"	1012,4678	$\frac{\text{M}}{\text{K c}}^2$
"cp"	1012,4678	$\frac{\text{M}}{\text{K c}}^2$
"Cha"	1019,8524	$\frac{\text{M}}{\text{K c}}^2$
"cp_ha"	1019,8524	$\frac{\text{M}}{\text{K c}}^2$
"P"	$1,0132 \cdot 10^5$	$\frac{\text{K}\Gamma}{\text{M c}}^2$
"P_w"	1174,489	$\frac{\text{K}\Gamma}{\text{M c}}^2$
"V"	0,8399	$\frac{\text{M}}{\text{K}\Gamma}^3$
"Vda"	0,8399	$\frac{\text{M}}{\text{K}\Gamma}^3$
"Vha"	0,8338	$\frac{\text{M}}{\text{K}\Gamma}^3$
"mu"	$1,8143 \cdot 10^{-5}$	$\frac{\text{K}\Gamma}{\text{M c}}^5$
"Visc"	$1,8143 \cdot 10^{-5}$	$\frac{\text{K}\Gamma}{\text{M c}}^5$
"M"	$1,8143 \cdot 10^{-5}$	$\frac{\text{K}\Gamma}{\text{M c}}^5$
"k"	0,0259	$\frac{\text{K}\Gamma \text{M}}{\text{K c}}^3$
"Conductivity"	0,0259	$\frac{\text{K}\Gamma \text{M}}{\text{K c}}^3$
"K"	0,0259	$\frac{\text{K}\Gamma \text{M}}{\text{K c}}^3$

## Содержание

Список основных условных обозначений.....	3
Глава 1. Основные законы идеальных газов .....	6
Глава 2. Первый закон термодинамики .....	21
Глава 3. Процессы изменения состояния идеального газа .....	28
Глава 4. Второй закон термодинамики.....	34
Глава 5. Реальные газы.....	44
Глава 6. Процессы течения газов и жидкостей. Дросселирование.....	61
Глава 7. Циклы газовых машин .....	72
Глава 8. Циклы паровых машин .....	86
Глава 9. Смеси идеальных газов .....	105
Глава 10. Влажный воздух.....	112
Список литературы.....	121
Приложения .....	122
Таблицы термодинамических свойств рабочих тел .....	123
Диаграммы .....	172
Пример использования библиотеки CoolProp в пакете математических вычислений Smath Studio .....	178

Цветков Олег Борисович  
Митропов Владимир Викторович

**Сборник задач по технической термодинамике**  
**Учебное пособие**

В авторской редакции  
Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО  
Зав. РИО Н.Ф. Гусарова  
Подписано к печати  
Заказ №  
Тираж  
Отпечатано на ризографе

**Редакционно-издательский отдел**  
**Университета ИТМО**  
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, литер А