Министерство общего и профессионального образования
Российской Федерации

Санкт-Петербургская государственная академия
холода и пищевых технологий



С. И. Бурцев
Ю. Н. Цветков

ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ. СОСТАВ И СВОЙСТВА

Учебное пособие

Санкт-Петербург 1998

ББК 22.3+22.32+22.21+22.213
Б 37
УДК 53

Бурцев С.И., Цветков Ю.Н.

Б 91 Влажный воздух. Состав и свойства:
Учеб. пособие. – СПб.: СПбГАХПТ, 1998. – 146 с.
ISBN 5-89565-005-8

В учебном пособии рассмотрены основные законы термодинамики идеальных газов и смесей, свойства сухого воздуха, водяного пара, воды и льда. Состав и свойства влажного воздуха ограничены диапазоном температур и давлений, характерных для процессов комфортного кондиционирования воздуха. Приведены данные по влиянию кривизны поверхности раздела фаз на давление насыщения, радиуса капли – на температуру её замерзания, а также зависимости для определения энтальпии, энтропии и эксергии влажного воздуха как гетерогенной смеси.

Даны примеры расчёта параметров влажного воздуха и составляющих его компонентов.

Предназначено для студентов и аспирантов, обучающихся по специальности 070200, а также инженеров, занимающихся проектированием систем комфортного кондиционирования воздуха.

Ил. – 25, табл. – 41, библиогр. – 25 назв.

Рецензенты
Кафедра холодильных машин Астраханского государственного технического университета (зав. кафедрой доктор техн. наук, проф. Л. В. Галимова)
Доктор техн. наук, проф. Г. И. Дымов (Санкт-Петербургский военно-инженерный технический университет)

Одобрено к изданию советом факультета криогенной техники и кондиционирования СПб ГАХПТ

ISBN 5-89565-005-8

© Санкт-Петербургская государственная академия холода и пищевых технологий, 1998

****

Список основных условных обозначений

c – удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К), Дж/(м^3·К)
d – влагосодержание, кг вл/кг с.в
E – эксергия, Дж
e – удельная эксергия, Дж/кг
G – энергия, Дж, массовая концентрация тумана, кг/м
g – массовая доля, концентрация
H – энтальпия, Дж
h – удельная энтальпия, Дж/кг
I – скорость образования зародышей во влажном воздухе, м$^{-1}$·с$^{-1}$
K – константа
k – показатель адиабаты
M – масса киломоля, кг/кмоль
m – масса, кг
N – численная концентрация тумана, м$^{-1}$
n – показатель политропы
q – удельное количество теплоты, Дж/кг
R – газовая постоянная, Дж/(кг·К)
r – объёмная доля, удельная теплота фазового перехода, Дж/кг
S – энтропия, Дж/К, пересыщение водяного пара
s – удельная энтропия, Дж/(кг·К)
T – абсолютная температура, К
t – температура, °С
U – внутренняя энергия, Дж
u – удельная внутренняя энергия, Дж/кг
V – объём, м^3
v – удельный объём, м^3/кг
w – скорость потока, м/с
x – степень сухости
Z – фактор сжимаемости газа
β – коэффициент объёмного расширения, К$^{-1}$
Δ – разность или изменение значений
μ – мольная или молекулярная масса, кмоль, химический потенциал
ξ – массовая концентрация
ρ – плотность, кг/м^3

σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м
τ – время, с
φ – относительная влажность
ψ – степень насыщения

Индексы

1 – вход
2 – выход
1–2 – процесс
в – вода
вл – влага
вл.в – влажный воздух
в.т – водяной туман
к – компонент
кр – кривизна
крт – критический
л – лёд
л.т – ледяной туман
н – насыщенный или наружный
0 – нормальные условия
о.с – окружающая среда
п – пар или парциальное давление
пл – плавление
пер – пересыщенный
пред – предельный
р – роса
с.в – сухой воздух
см – смесь
см.т – смешанный туман
суб – сублимация
p – изобарный процесс
v – изохорный процесс
i – порядковый номер компонента
$'$ – кипящая вода
$''$ – насыщенный пар
$\bar{}$ – среднее значение

****

Предисловие

Глубокое знание и понимание термодинамики влажного воздуха является основой дальнейшего успешного изучения дисциплин по специальности 070200.

Предлагаемая вниманию читателей книга содержит подробные сведения о составе и свойствах воды, водяного пара, сухого и влажного воздуха.

Особое внимание обращено на формулировку основных понятий и терминов, широко используемых в кондиционировании воздуха. Такая необходимость диктуется тем, что в используемой в настоящее время литературе даже трактовка основополагающего понятия "влажный воздух" или зависимость для определения его энтальпии неодинакова. Под термином "влажный воздух" понимают гомогенную смесь сухого воздуха и водяного пара, или гетерогенную смесь, включающую и взвешенные в воздухе капли воды, и кристаллы льда. Приводимые формулы для определения энтальпии влажного воздуха имеют разные значения удельных теплоёмкостей сухого воздуха и водяного пара и теплоты фазового перехода, а их вывод дан на основе экспериментальных данных или теоретических предпосылок. Необходим единый подход к трактовке понятий и используемых зависимостей.

Анализ термодинамических параметров влажного воздуха ограничен диапазоном температур (от минус 50 до 50°С) и давлений (от 95 до 115 кПа), которые могут иметь место при комфортном кондиционировании воздуха.

Авторы сочли необходимым в разделе 1 кратко изложить основные законы термодинамики идеальных газов и смесей, которым подчиняется в указанном диапазоне температур и давлений влажный воздух, и остановиться более подробно на свойствах льда и тумана, влиянии кривизны поверхности раздела фаз на давление насыщения, зависимости температуры замерзания капель воды от давления и других вопросах.

Авторы будут благодарны всем, кто ознакомится с содержанием книги и сообщит свои замечания и предложения по адресу: 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, Бюро техники кондиционирования и охлаждения.

За полезные замечания при рецензировании книги авторы приносят глубокую благодарность коллективу кафедры холодильных машин Астраханского государственного технического университета (зав. кафедрой доктор техн. наук, проф. Л.В. Галимова) и доктору техн. наук, проф. Г.И. Дымову, а также Е.Л. Масальцевой, Д.Е. Мышковскому и Е.М. Ниловой за огромную помощь в подготовке рукописи к изданию.

****

1. Термодинамика идеальных газов и смесей. Основные понятия и соотношения

1.1. Основные положения

Термодинамические исследования обычно начинаются с выделения ограниченной области пространства, подлежащей рассмотрению. Содержимое этой области называется ***термодинамической системой***. Всё то, что находится вне системы – это внешняя окружающая среда. Система отделяется от внешней среды материальной или воображаемой поверхностью – ***границей системы***. Границам системы часто приписывают идеализированные свойства, особенно проницаемости вещества и энергии.

Границы термодинамической системы могут быть ***закрытыми*** или ***открытыми***.

Граница закрытой системы непроницаема для вещества, поэтому в ней содержится одно и то же количество вещества, однако объём, замкнутый границей, может меняться, если границы системы подвижны. Пример закрытой системы дан на рис. 1.1.

Если границы системы проницаемы для вещества, то такая система называется открытой. Примером такой системы является теплообменник, показанный на рис. 1.2.

Если границы системы не только непроницаемы для вещества, но и препятствуют другим взаимодействиям (например, энергообмену) между системой и её внешней средой, то такая система является ***изолированной***. Каждая изолированная система – закрытая.

Установление границ между системой и её внешней средой является необходимым, но недостаточным элементом описания системы. Система должна описываться рядом переменных, т. е. физических величин, характеризующих её свойства. Если системой является определённое количество газа, то для описания свойств этой системы задаётся несколько макроскопических переменных, например, объём и давление.

Если переменные принимают устойчивые значения, то система находится в определённом состоянии. Эти переменные, характеризующие устойчивое состояние системы, называются ***параметрами состояния***.

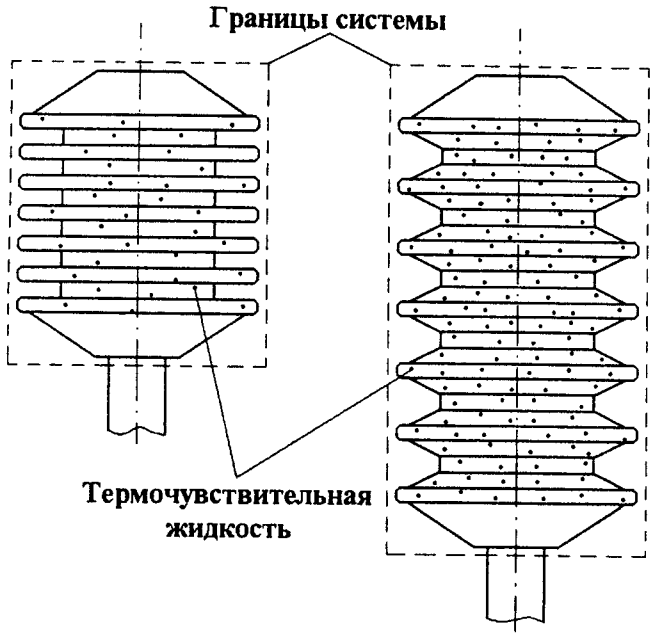


Рис. 1.1. Пример закрытой системы с подвижной границей. Термобаллон с термочувствительной жидкостью – элемент регулятора температуры прямого действия

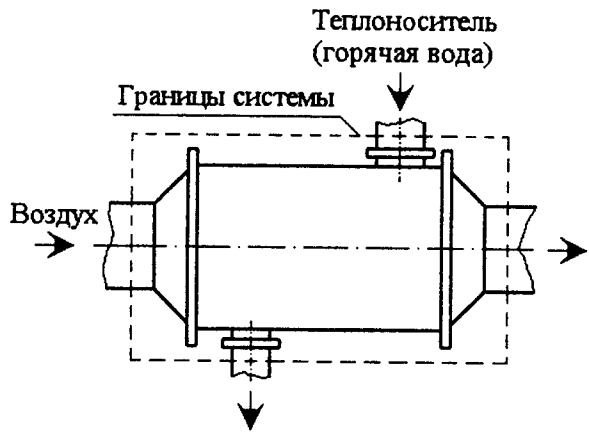


Рис. 1.2. Пример открытой системы. Водяной подогреватель воздуха

Система находится в ***термодинамическом равновесии***, если при изоляции её от воздействия внешней среды параметры состояния системы не изменяются. Необходимо отметить, что для описания равновесных состояний достаточно нескольких параметров состояния.

Система называется ***гомогенной***, если её химический состав и физические свойства в пределах границ системы одинаковы. Однородность химического состава существует не только в случаях, когда система состоит из единственного чистого вещества. Этому требованию удовлетворяют и смеси различных газов, если только состав смеси одинаков во всей системе и они не вступают друг с другом в химические реакции. Таким образом, ***гомогенная система состоит из одной фазы***.

Система из двух или более фаз называется гетерогенной.

Так, примером гомогенной системы является воздух, состоящий из смеси различных газов и водяного пара, а гетерогенной системы – туман, когда наряду с газовой фазой в системе присутствует жидкая (капли воды) или твёрдая (кристаллы льда) фаза.

Параметры состояния, значения которых определяются суммой параметров состояния составляющих частей условно разделённой системы, называются ***экстенсивными параметрами состояния***. Примерами экстенсивных параметров состояния являются объём и масса.

Если рассматривается гомогенная система, то при разделении её на части объём делится пропорционально массе. Это справедливо не только для объёма, но и для всех других экстенсивных величин. ***Экстенсивные параметры состояния***, следовательно, ***определяют размер рассматриваемой системы***. Особенно удобна для этих целей масса вещества.

Параметры состояния, значения которых остаются одинаковыми во всех частях гомогенной системы, называются ***интенсивными параметрами состояния***. Они не зависят от размеров системы. К числу таких параметров можно отнести давление, температуру и другие.

Во многих термодинамических исследованиях масса вещества не имеет значения, а интерес представляет только интенсивное состояние. При этом вместо экстенсивных используют ***удельные параметры состояния***, которые ведут себя как интенсивные параметры: при разделении системы они остаются постоянными. Поэтому интенсивное состояние системы можно описывать также удельными параметрами состояния.

Так, удельный объём v получается путём деления объёма системы на её массу m

$$v = \frac{V}{m}, \tag{1.1}$$

а плотность

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{v}. \tag{1.2}$$

В общем случае любой экстенсивный параметр состояния E, делённый на массу m, становится соответствующим удельным параметром состояния

$$e \equiv \frac{E}{m}.$$

На рис. 1.3. показана термодинамическая система в целом (жилой блок – V, m, p, ρ, v) и при её разделении (кабинет – V_1, m_1, T, p, ρ, v; спальня – V_2, m_2, T, p, ρ, v), а также характер поведения экстенсивных ($V = V_1 + V_2$; $m = m_1 + m_2$), интенсивных (T, p) и удельных (ρ, v) параметров газа.

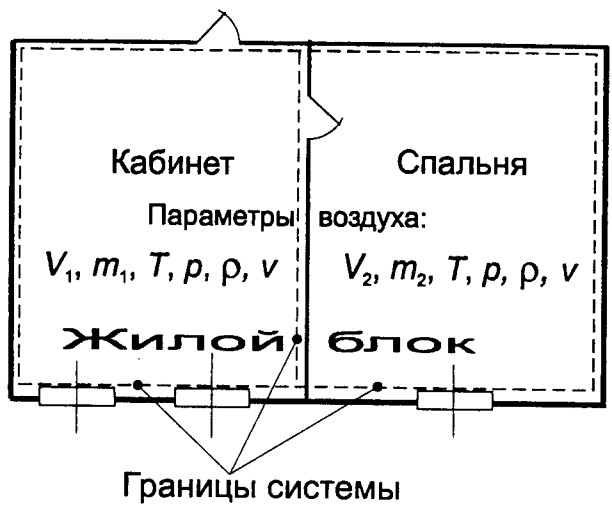


Рис. 1.3. Термодинамическая система

1.2. Идеальный газ

Простая гомогенная система в каждом равновесном состоянии характеризуется определёнными значениями параметров состояния v, p и T. Между ними существует зависимость $F(p, v, T) = 0$, которая называется ***термическим уравнением состояния***.

Но состояние системы вполне определяется заданием двух из этих параметров, так что третий параметр является для каждого равновесного состояния функцией двух других.

Таким образом, можно записать, что

$$p = f_1(v,T), \quad v = f_2(p,T), \quad T = f_3(v,p).$$

Термическое уравнение состояния газов при малых давлениях принимает простое выражение. Если по измеренным значениям p, v и T рассчитать величину pv/T, то

$$\lim_{p\to 0} \frac{pv}{T} = \text{const} = R. \tag{1.3}$$

Константа R называется ***газовой постоянной*** и имеет для каждого газа своё значение. Она представляет собой работу 1 кг газа при постоянном давлении и при изменении температуры на 1 градус. Поведение этой величины для воздуха представлено на рис. 1.4. Как видно из рисунка, предельное условие справедливо не только при $p = 0$, но и выдерживается с достаточно хорошим приближением при невысоких давлениях воздуха. Штриховые горизонтальные линии на рис. 1.4 выделяют области отклонений pv/T от предельного значения R по уравнению (1.3). Заштрихованная область охватывает возможный диапазон температур и давлений для систем комфортного кондиционирования, поэтому в качестве термического уравнения состояния воздуха можно использовать простые зависимости

$$pv = RT, \quad pV = mRT, \quad p = \rho RT. \tag{1.4}$$

Газы, строго подчиняющиеся уравнению (1.4), называются ***идеальными***, а само уравнение $pv = RT$ – ***термическим уравнением состояния идеальных газов***, или уравнением Клапейрона.

При так называемых нормальных условиях (p = 101,325 кПа, T = 273,15 К) объём 1 кмоль идеального газа $v\mu$ (произведение удельного объёма v на его молекулярную массу μ) есть величина постоянная и равна 22,4143 м^3/кмоль (закон Авогадро). Произведение μR носит название ***универсальной газовой постоянной***. Её значение может быть вычислено из уравнения (1.4) для 1 кмоль газа

$$\mu R = \frac{pV_\mu}{T} = \frac{101\,325 \cdot 22{,}4143}{273{,}15} = 8314{,}2 \text{ Дж/(кмоль·К)}.$$

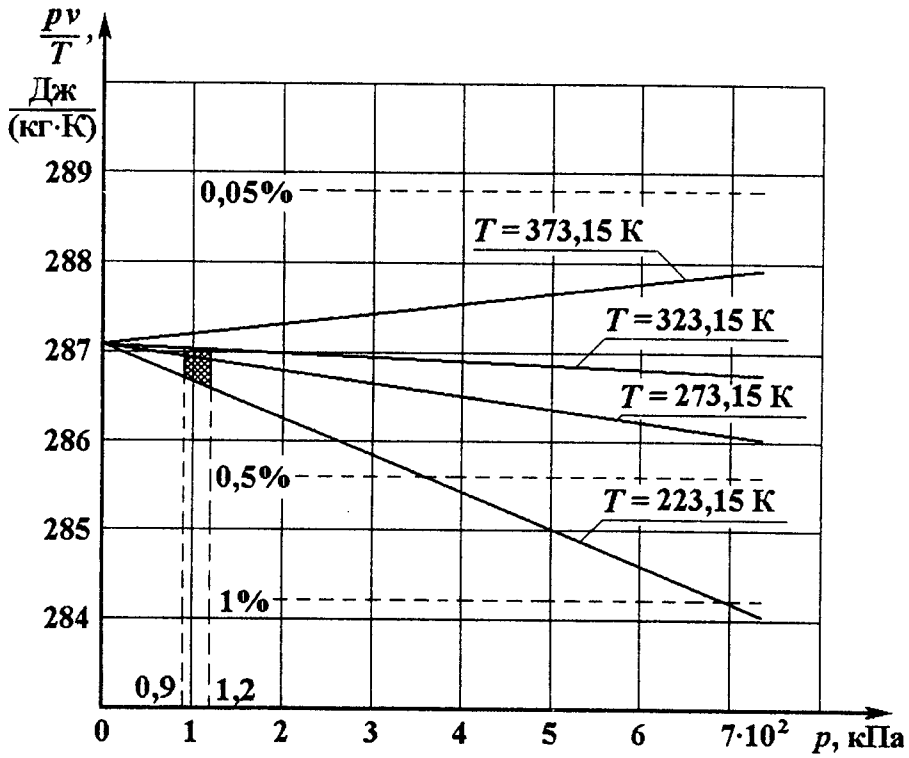


Рис. 1.4. Зависимость газовой постоянной для воздуха от давления при различной температуре

Для иллюстрации использования уравнений в нижеприводимых примерах расчёта будем предполагать, что реальные газы подчиняются уравнению состояния идеального газа.

Примеры

Пример 1.1. При нормальных условиях (p_0 = 101,325 кПа, T = 213,15 К) масса кислорода O_2, содержащегося в 1 кг сухого воздуха, равна m_{O_2} = 0,2315 кг, а объём V_{O_2} = 0,1621 м^3. Определить газовую постоянную, удельный объём и плотность.

Из уравнения (1.4)

$$R_{O_2} = \frac{pV_{O_2}}{m_{O_2}T} = \frac{101\,325 \cdot 0{,}1621}{0{,}2315 \cdot 273{,}15} = 259{,}75 \text{ Дж/(кг·К)}.$$

Удельный объём

$$v_{O_2} = \frac{V_{O_2}}{m_{O_2}} = 0{,}7002 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Плотность кислорода

$$\rho_{O_2} = \frac{m_{O_2}}{V_{O_2}} = \frac{1}{v_{O_2}} = 1{,}4281 \text{ кг}/\text{м}^3.$$

Пример 1.2. На входе в подогреватель газ имеет следующие параметры: p_1 = 101,6 кПа и T_1 = 248,15 К. Аэродинамическое сопротивление аппарата 275 Па. Температура газа на выходе T_2 = 298,15 К. Определить удельный объём и плотность газа на входе и выходе из подогревателя (считать R = 259,75 Дж/(кг·К)).

Из уравнения (1.4.) находим удельный объём v_1 и плотность ρ_1 на входе в подогреватель

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{259{,}75 \cdot 248{,}15}{101\,600} = 0{,}6344 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$\rho_1 = \frac{1}{v_1} = \frac{1}{0{,}6344} = 1{,}5763 \text{ кг/м}^3.$$

Давление газа на выходе

$$p_2 = 101\,600 - 275 = 101\,325 \text{ Па}.$$

Тогда на выходе из аппарата

$$v_2 = \frac{RT_2}{p_2} = \frac{259{,}75 \cdot 298{,}15}{101\,325} = 0{,}7643 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$\rho_2 = \frac{1}{v_2} = \frac{1}{0{,}7643} = 1{,}3084 \text{ кг/м}^3.$$

Пример 1.3. Определить газовую постоянную азота.

Молекулярная масса азота μ_{N_2} = 28,0134. Используя значение универсальной газовой постоянной, получим

$$R_{N_2} = \frac{8314{,}2}{\mu_{N_2}} = \frac{8314{,}2}{28{,}0134} = 296{,}79 \text{ Дж/(кг·К)}.$$

Каждый идеальный газ характеризуется также удельными теплоёмкостями.

Под ***удельной теплоёмкостью газа*** понимают отношение теплоты, полученной единицей количества вещества при бесконечно малом изменении его состояния, к изменению температуры.

Теплоёмкость является функцией процесса и не входит в число термодинамических параметров.

Различают массовую и объёмную теплоёмкости.

Теплоёмкость, отнесённую к 1 кг газа, называют ***удельной массовой*** и обозначают c. Единица теплоёмкости – килоджоуль на килограмм-кельвин.

Теплоёмкость, отнесённую к 1 м^3 при нормальных физических условиях (давление $p_0 = 101{,}325$ кПа, температура $T_0 = 273{,}15$ К), называют ***удельной объёмной*** и обозначают c'. Единица – килоджоуль на кубический метр-кельвин.

Теплоёмкость, отнесённую к 1 кмоль газа, называют ***удельной мольной*** и обозначают μc. Единица – килоджоуль на киломоль-кельвин.

Между указанными удельными теплоёмкостями существует следующая зависимость:

$$c = c' v_0, \tag{1.5}$$

где v_0 – удельный объём газа при нормальных условиях.

Теплоёмкости зависят от характера процесса. В термодинамике имеют большое значение удельная теплоёмкость при постоянном объёме c_v (***изохорная теплоёмкость***), равная отношению количества теплоты к изменению температуры тела в процессе при постоянном объёме, и удельная теплоёмкость при постоянном давлении c_p (***изобарная теплоёмкость***), равная отношению количества теплоты к изменению температуры тела в процессе при постоянном давлении.

Для идеального газа связь между изобарной и изохорной теплоёмкостями определяется уравнением Майера

$$c_p - c_v = R, \tag{1.6}$$

или

$$\mu c_p - \mu c_v = 8314{,}2.$$

Удельные теплоёмкости идеальных газов c_p и c_v в общем случае представляют собой сложные функции температуры. Если требуется учесть зависимость теплоёмкости от температуры, т. е. определить среднее значение $\bar{c}$ в интервале температур от T_1 до T_2, то используют соотношение

$$\bar{c}\Big|_{T_1}^{T_2} = \frac{1}{T_2 - T_1}\int_{T_1}^{T_2} c\,\mathrm{d}T.$$

Обычно средние значения удельных теплоёмкостей задаются в табличной форме для интервала температур от 0 до t°C. Тогда среднее значение может быть вычислено по формуле

$$\bar{c}\Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{\bar{c}\Big|_0^{t_2} t_2 - \bar{c}\Big|_0^{t_1} t_1}{t_2 - t_1}. \qquad (1.7)$$

Примеры

Пример 1.4. Средняя массовая удельная теплоёмкость кислорода O_2 $\bar{c}_{p_{O_2}}$ при постоянном давлении для различных температур приведена ниже:

t,°C	0	25	50	100
$\bar{c}_{p_{O_2}}$, кДж/(кг·К)	0,9148	0,9164	0,9182	0,9230

Определить средние значения массовой удельной теплоёмкости при постоянном объёме $\bar{c}_{v_{O_2}}$, объёмной удельной теплоёмкости при постоянном давлении $\bar{c}'_{p_{O_2}}$ и постоянном объёме $\bar{c}'_{v_{O_2}}$ $\left(R_{O_2} = 259{,}75\,\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}),\ v_0 = 0{,}7002\,\text{м}^3/\text{кг}\right)$.

Из выражения (1.6) следует, что

$$\bar{c}_{v_{O_2}} = \bar{c}_{p_{O_2}} - R\ .$$

Тогда $\bar{c}_{v_{O_2}} = \begin{cases} 0{,}9148 - 0{,}25975 = 0{,}6550\ \text{кДж/ (кг·К)} & \text{при } t = 0\,^\circ\text{C}; \\ 0{,}9164 - 0{,}25975 = 0{,}6566\ \text{кДж/ (кг·К)} & \text{при } t = 25\,^\circ\text{C}; \\ 0{,}9182 - 0{,}25975 = 0{,}6584\ \text{кДж/ (кг·К)} & \text{при } t = 50\,^\circ\text{C}; \\ 0{,}9230 - 0{,}25975 = 0{,}6632\ \text{кДж/ (кг·К)} & \text{при } t = 100\,^\circ\text{C}. \end{cases}$

Из выражения (1.5) получим

$$\bar{c}'_{p_{O_2}} = \frac{\bar{c}'_{p_{O_2}}}{\nu_0}.$$

Тогда $\bar{c}'_{p_{O_2}} = \begin{cases} \dfrac{0{,}9148}{0{,}7002} = 1{,}3065 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}) & \text{при} \quad t = 0\,^\circ\text{C}; \\ \dfrac{0{,}9164}{0{,}7002} = 1{,}3080 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}) & \text{при} \quad t = 25\,^\circ\text{C}; \\ \dfrac{0{,}9182}{0{,}7002} = 1{,}3113 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}) & \text{при} \quad t = 50\,^\circ\text{C}; \\ \dfrac{0{,}9230}{0{,}7002} = 1{,}3182 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}) & \text{при} \quad t = 100\,^\circ\text{C}. \end{cases}$

Из выражений (1.5) и (1.6) следует, что

$$\bar{c}'_{\nu_{O_2}} = \bar{c}'_{p_{O_2}} - \frac{R}{\nu_0}.$$

Следовательно, будем иметь

$$\bar{c}'_{\nu_{O_2}} = \begin{cases} 1{,}3065 - \dfrac{0{,}25975}{0{,}7002} = 0{,}9355 \text{ кДж}/\left(\text{м}^3 \cdot \text{К}\right) & \text{при} \quad t = 0\,^\circ\text{C}; \\ 1{,}3080 - \dfrac{0{,}25975}{0{,}7002} = 0{,}9370 \text{ кДж}/\left(\text{м}^3 \cdot \text{К}\right) & \text{при} \quad t = 25\,^\circ\text{C}; \\ 1{,}3113 - \dfrac{0{,}25975}{0{,}7002} = 0{,}9403 \text{ кДж}/\left(\text{м}^3 \cdot \text{К}\right) & \text{при} \quad t = 50\,^\circ\text{C}; \\ 1{,}3182 - \dfrac{0{,}25975}{0{,}7002} = 0{,}9472 \text{ кДж}/\left(\text{м}^3 \cdot \text{К}\right) & \text{при} \quad t = 100\,^\circ\text{C}. \end{cases}$$

Результаты расчёта и исходные данные сведены в таблицу:

Средняя удельная теплоёмкость	Обозначение	Единица	Температура t, °С			
			0	25	50	100
Массовая при постоянном давлении	$\bar{c}_{p_{O_2}}$	кДж/(кг·К)	0,9148	0,9164	0,9182	0,9230
Массовая при постоянном объёме	$\bar{c}_{\nu_{O_2}}$	кДж/(кг·К)	0,6550	0,6566	0,6584	0,6632
Объёмная при постоянном давлении	$\bar{c}'_{p_{O_2}}$	кДж/(м³·К)	1,3065	1,3080	1,3113	1,3182
Объёмная при постоянном объёме	$\bar{c}'_{\nu_{O_2}}$	кДж/(м³·К)	0,9355	0,9370	0,9403	0,9472

Пример 1.5. Используя данные таблицы в примере 1.4, определить среднюю массовую удельную теплоёмкость кислорода для диапазона температур от 25 до 100°С.

Для диапазона температур от 0 до 25°С средняя массовая удельная теплоёмкость

$$\bar{c}_{p_{O_2}} = 0{,}9164 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Для диапазона температур от 0 до 100°С

$$\bar{c}_{p_{O_2}} = 0{,}9230 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

По формуле (1.7) будем иметь

$$\bar{c}_{p_{O_2}}\Big|_{25°C}^{100°C} = \frac{0{,}9230 \cdot 100 - 0{,}9164 \cdot 25}{100 - 25} = 0{,}9252 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Энтальпия H относится к экстенсивным параметрам, так как её величина пропорциональна массе.

Удельная энтальпия h, то есть энтальпия, отнесённая к 1 кг массы, представляет собой сложную функцию вида $h = f(u, p, v)$, где u – удельная внутренняя энергия газа.

Поскольку входящие в выражение удельной энтальпии величины u, p и v являются параметрами состояния, то и сама удельная энтальпия будет также параметром состояния.

В термодинамике не требуется знание абсолютного значения энтальпии, поэтому её отсчитывают от некоторого условного нуля.

Для идеального газа принято считать энтальпию равной нулю при температуре $t_0 = 0$°С.

Приращение энтальпии для любого процесса изменения состояния идеального газа в пределах одной фазы (газообразной, жидкой или твердой) определяется формулой

$$\Delta h_{1-2} = h_2 - h_1 = \bar{c}_p (T_2 - T_1).$$

Если считать $h_{t=0} = 0$, то энтальпия газа при температуре t

$$h = \bar{c}_p t. \qquad (1.8)$$

Пример

Пример 1.6. Определить удельную энтальпию кислорода O_2 при температурах 25, 50 и 100°С. Данные по средним массовым удельным теплоёмкостям $\bar{c}_{p_{O_2}}$ взять из примера 1.4.

Согласно формуле (1.8),

$$h_{O_2} = \bar{c}_{p_{O_2}} t = \begin{cases} 0{,}9164 \cdot 25 = 22{,}91 \text{ кДж/кг} & \text{при } t = 25^\circ\text{C}; \\ 0{,}9182 \cdot 50 = 45{,}91 \text{ кДж/кг} & \text{при } t = 50^\circ\text{C}; \\ 0{,}9230 \cdot 100 = 92{,}30 \text{ кДж/кг} & \text{при } t = 100^\circ\text{C}. \end{cases}$$

Энтропия S – однозначная функция состояния газа, являющаяся экстенсивным параметром состояния термодинамической системы.

Под ***удельной энтропией*** s понимают энтропию, отнесённую к 1 кг массы газа.

Для идеальных газов условно принято считать удельную энтропию равной нулю при нормальных физических условиях. В этом случае энтропия идеального газа может быть найдена из следующих выражений:

$$s = \bar{c}_v \ln\frac{T}{273{,}15} + R\ln\frac{v}{v_0}; \tag{1.9}$$

$$s = \bar{c}_p \ln\frac{T}{273{,}15} - R\ln\frac{p}{101\,325}; \tag{1.10}$$

$$s = \bar{c}_p \ln\frac{v}{v_0} + \bar{c}_v \ln\frac{p}{101\,325}. \tag{1.11}$$

Пример

Пример 1.7. Определить удельную энтропию кислорода при нормальном атмосферном давлении ($p = 101{,}325$ кПа) и температуре 50 и 100°С. Средние значения удельной теплоёмкости взять из примера 1.4: $\bar{c}_{p_{O_2}}\Big|_{0^\circ\text{C}}^{50^\circ\text{C}} = 0{,}9182 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$ и $\bar{c}_{p_{O_2}}\Big|_{0^\circ\text{C}}^{100^\circ\text{C}} = 0{,}9230 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$

Для расчёта используем формулу (1.10). Так как давление постоянно, то второй член равен нулю.

Тогда $s = \bar{c}_{p_{O_2}} \ln\frac{T}{273{,}15}$ и, следовательно,

при $t = 50$°С

$$s = 0{,}9182 \cdot \ln\frac{323{,}15}{273{,}15} = 0{,}1543 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)};$$

при $t = 100$°С

$$s = 0{,}9230 \cdot \ln\frac{373{,}15}{273{,}15} = 0{,}2879 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Эксергия E – это свойство термодинамической системы или потока энергии, определяемое количеством работы, которое может быть получено внешним приёмником энергии при обратимом их взаимодействии с окружающей средой до установления полного равновесия.

Под ***удельной эксергией*** e понимают эксергию, отнесённую к 1 кг массы газа.

Для произвольного начального состояния газа с параметрами p и T или $h = h(p,T)$ и $s = s(p,T)$ функция

$$e = (h - h_{\text{о.с}}) - T_{\text{о.с}}(s - s_{\text{о.с}}) \qquad (1.12)$$

называется ***эксергией потока***. Эта функция определяется параметрами состояния газа (p, T или h, s) и параметрами окружающей среды ($p_{\text{о.с}}$, $T_{\text{о.с}}$ или $h_{\text{о.с}}$, $s_{\text{о.с}}$).

Для заданного состояния газа значение эксергии равно максимальной полезной работе, которую способен совершить газ, переходя обратимым путём на «нулевой уровень» (окружающая среда с параметрами $p_{\text{о.с}}$, $T_{\text{о.с}}$).

Пример

Пример 1.8. Определить удельную эксергию кислорода, находящегося в воздухе помещения, при нормальном атмосферном давлении и t = 50°С, если температура окружающего воздуха $t_{\text{о.с}} = 0°\text{C}$ $\left(\text{при } \bar{c}_{p_{O_2}}\Big|_0^{50} = 0{,}9182 \text{ кДж/(кг·К)}\right)$.

Для определения эксергии воспользуемся формулами (1.8), (1.10) и (1.12). Учитывая, что энтальпия $h_{\text{о.с}}$ и энтропия $s_{\text{о.с}}$ при t = 0°С и $p_0 = 101\,325$ Па равны нулю, а давление постоянно, будем иметь

$$e_{O_2} = \bar{c}_{p_{O_2}}\Big|_0^{50} t - T_{\text{о.с}}\bar{c}_{p_{O_2}}\Big|_0^{50} \ln\frac{T}{T_{\text{о.с}}} = 0{,}9182 \cdot 50 - 273{,}15 \cdot 0{,}9182 \ln\frac{323{,}15}{273{,}15} =$$
$$= 3{,}751 \text{ кДж/кг}.$$

1.3. Свойства газовых смесей

1.3.1. Газовая смесь

Под ***газовой смесью*** понимается механическая смесь отдельных газов, не вступающих между собой ни в какие химические реакции. Каждый газ в смеси, независимо от других газов, полностью сохраняет все свои свойства и ведет себя так, как если бы он один занимал весь объём смеси.

Все реальные газы в интересующем нас диапазоне температур (от минус 50 до 50°С) и атмосферном или близком к нему давлении полностью подходят под понятие ***идеального газа.*** При дальнейшем рассмотрении будем считать, что каждый отдельный газ, входящий в смесь, является идеальным газом. Так как смесь состоит из нескольких компонентов, то её состояние не может быть определено лишь двумя параметрами. Для смеси необходимы дополнительные величины, характеризующие состав смеси.

1.3.2. Состав газовой смеси

Состав смеси идеальных газов может быть задан ***массовыми долями*** g_i, т. е. отношением массы компонента смеси m_i к массе всей смеси $m_{см}$

$$g_1 = \frac{m_1}{m_{см}},\ g_2 = \frac{m_2}{m_{см}},\ \ldots,\ g_n = \frac{m_n}{m_{см}}. \qquad (1.13)$$

При этом

$$m_1 + m_2 + \ldots + m_n = \sum_1^n m_i = m_{см};$$

$$g_1 + g_2 + \ldots + g_n = \sum_1^n g_i = 1.$$

Часто состав смеси идеальных газов задают объёмными долями r_i, т. е. отношением парциального объёма компонента V_i к объёму смеси $V_{см}$

$$r_1 = \frac{V_1}{V_{см}},\ r_2 = \frac{V_2}{V_{см}},\ \ldots,\ r_n = \frac{V_n}{V_{см}}. \qquad (1.14)$$

При этом

$$V_1 + V_2 + \ldots + V_n = \sum_1^n V_i = V_{см};$$

$$r_1 + r_2 + \ldots + r_n = \sum_1^n r_i = 1.$$

Под ***парциальным объёмом газа*** понимают объём, который занимал бы этот газ, если бы его температура и давление соответствовали температуре и давлению смеси.

Соотношения между массовыми и объёмными концентрациями имеют вид

$$g_i = \frac{\rho_i}{\rho_{см}} r_i = \frac{V_{см}}{V_i} r_i = \frac{\mu_i}{\mu_{см}} r_i = \frac{R_{см}}{R_i} r_i$$

или (1.15)

$$r = \frac{\rho_{см}}{\rho_i} g_i = \frac{V_i}{V_{см}} g_i = \frac{\mu_{см}}{\mu_i} g_i = \frac{R_i}{R_{см}} g_i.$$

Примеры

Пример 1.9. Состав сухого воздуха задан массовыми долями: азот – $g_{N_2} = 0{,}7552$; кислород – $g_{O_2} = 0{,}2315$, остальные компоненты – $g_к = 0{,}0133$. Определить: объём смеси, парциальные объёмы и объёмные доли компонентов для 1 кг сухого воздуха при нормальных условиях. Принять: $\mu_{N_2} = 28{,}0134$ кг/кмоль, $\mu_{O_2} = 31{,}9988$ кг/кмоль, $\mu_к = 33{,}786$ кг/кмоль, $\mu_{с.в} = 28{,}912$ кг/кмоль, $\rho_{с.в} = 1{,}29\ кг/м^3$.

Используя формулу (1.13), найдём массу компонентов

$$m_{N_2} = m_{с.в} g_{N_2} = 1 \cdot 0{,}7552 = 0{,}7552 \text{ кг};$$

$$m_{O_2} = 0{,}2315 \text{ кг};$$

$$m_к = 0{,}0133 \text{ кг}.$$

Из соотношения (1.15) $g_i = \frac{\mu_i}{\mu_{с.в}} r_i$ найдем объёмные доли компонентов

$$r_{N_2} = g_{N_2} \frac{\mu_{с.в}}{\mu_{N_2}} = 0{,}7552 \cdot \frac{28{,}912}{28{,}0134} = 0{,}7794;$$

$$r_{O_2} = 0{,}2315 \cdot \frac{28{,}912}{31{,}9988} = 0{,}2092;$$

$$r_к = 0{,}0133 \cdot \frac{28{,}912}{33{,}786} = 0{,}01138;$$

$$r_{\text{с.в}} = \sum_1^n r_i = 0{,}7794 + 0{,}2092 + 0{,}01138 = 0{,}99998.$$

Объём сухого воздуха

$$V_{\text{с.в}} = \frac{m_{\text{с.в}}}{\rho_{\text{с.в}}} = \frac{1}{1{,}29} = 0{,}7752\ \text{м}^3.$$

Парциальные объёмы компонентов V_i составят

$$V_{N_2} = r_{N_2} V_{\text{с.в}} = 0{,}6042\ \text{м}^3; \quad V_{O_2} = r_{O_2} V_{\text{с.в}} = 0{,}1622\ \text{м}^3;$$

$$V_{\text{к}} = r_{\text{к}} V_{\text{с.в}} = 0{,}00882\ \text{м}^3; \quad \sum_1^n V_i = 0{,}7752\ \text{м}^3.$$

Пример 1.10. Общий объём помещения 25 м^3. Используя данные примера 1.9 для сухого воздуха, определить массу и объём компонентов.

Масса сухого воздуха в помещении

$$m_{\text{с.в}} = \rho_{\text{с.в}} V_{\text{с.в}} = 1{,}29 \cdot 25 = 32{,}25\ \text{кг}.$$

Масса компонентов $m_i = m_{\text{с.в}} g_i$ будет составлять

$$m_{N_2} = 32{,}25 \cdot 0{,}7552 = 24{,}355\ \text{кг}; \quad m_{O_2} = 32{,}25 \cdot 0{,}2315 = 7{,}466\ \text{кг};$$

$$m_{\text{к}} = 32{,}25 \cdot 0{,}0133 = 0{,}429\ \text{кг}.$$

Объём, занимаемый компонентами, можно определить по формуле $V_i = r_i V_{\text{с.в}}$:

$$V_{N_2} = 0{,}7794 \cdot 25 = 19{,}485\ \text{м}^3;$$

$$V_{O_2} = 0{,}2092 \cdot 25 = 5{,}230\ \text{м}^3;$$

$$V_{\text{к}} = 0{,}01138 \cdot 25 = 0{,}285\ \text{м}^3.$$

1.3.3. Закон Дальтона

Как известно, смесь идеальных газов подчиняется закону Дальтона, который гласит, что общее давление смеси газов $p_{\text{см}}$ равно сумме парциальных давлений отдельных газов p_i, составляющих смесь,

$$p_{\text{см}} = p_1 + p_2 + \ldots + p_n = \sum_1^n p_i. \qquad (1.16)$$

Под парциальным давлением понимают такое давление, которое имел бы газ, входящий в состав смеси, если бы он находился в том же количестве, в том же объёме и при той же температуре, что и в смеси.

1.3.4. Газовая постоянная смеси

Уравнение Клапейрона (1.4) справедливо как для отдельного компонента, так и для смеси в целом

$$p_i V_{см} = m_i R_i T_{см}; \tag{1.17}$$

$$p_{см} V_{см} = m_{см} R_{см} T_{см}. \tag{1.18}$$

Если просуммировать уравнение (1.17) по всем компонентам, то получим

$$V_{см} \sum_1^n p_i = T_{см} \sum_1^n m_i R_i. \tag{1.19}$$

Согласно закону Дальтона (1.16), левые части уравнений (1.18) и (1.19) равны, следовательно, равны и правые. Поэтому можно получить следующее выражение для газовой постоянной смеси:

$$R_{см} = \sum_1^n g_i R_i. \tag{1.20}$$

Если задан объёмный состав смеси, то

$$R_{см} = \frac{1}{\sum_1^n \frac{r_i}{R_i}}. \tag{1.21}$$

Понятие универсальной газовой постоянной распространяется и на смеси

$$\mu_1 R_1 = \mu_2 R_2 = \ldots = \mu_n R_n = \mu_{см} R_{см} = 8314{,}2 \text{ Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К}).$$

1.3.5. Молекулярная масса газовой смеси

Если известна величина универсальной газовой постоянной смеси $\mu_{см} R_{см}$, то ***средняя молекулярная масса***, представляющая собой условную величину и относящаяся к такому однородному газу, у которого число молекул и общая масса равны числу молекул и массе смеси газов, определяется из выражения

$$\mu_{см} = \frac{8314{,}2}{R_{см}}. \qquad (1.22)$$

Если смесь задана массовыми долями, то

$$\mu_{см} = \frac{1}{\frac{g_1}{\mu_1} + \frac{g_2}{\mu_2} + \ldots + \frac{g_n}{\mu_n}} = \frac{1}{\sum_1^n \frac{g_i}{\mu_i}}. \qquad (1.23)$$

При задании смеси объёмными долями

$$\mu_{см} = r_1\mu_1 + r_2\mu_2 + \ldots + r_n\mu_n = \sum_i^n r_i\mu_i. \qquad (1.24)$$

1.3.6. Парциальное давление компонентов газовой смеси

Парциальные давления газа могут быть определены:
– через массовые доли из уравнения Клапейрона

$$p_i = \frac{m_i R_i T_{см}}{V_{см}} = p_{см} g_i \frac{R_i}{R_{см}} = p_{см} g_i \frac{\mu_{см}}{\mu_i}, \qquad (1.25)$$

– через объёмные доли – из закона Бойля–Мариотта

$$p_i = p_{см} \frac{V_i}{V_{см}} = r_i p_{см}. \qquad (1.26)$$

Пример

Пример 1.11. При имитации глубоководного погружения в барокамере на глубину 620 м использовалась дыхательная газовая смесь (ДГС), состоящая из 0,65% кислорода, 0,17% азота и 99,18% гелия по объёму при $p_{ДГС}$ = 6,3 МПа и T = 298 К. Определить для 1 м^3 ДГС:

– массовые доли компонентов, массу ДГС и компонентов;
– газовую постоянную и молекулярную массу ДГС;
– плотность смеси и удельный объём;
– парциальные давления компонентов

при

$R_{O_2} = 259{,}83$ Дж/(кг · К), $R_{N_2} = 296{,}8$ Дж/(кг · К), $R_{He} = 2077{,}2$ Дж/(кг · К),

$\mu_{O_2} = 31{,}9988$ кг/кмоль, $\mu_{N_2} = 28{,}0134$ кг/кмоль, $\mu_{He} = 4{,}0026$ кг/кмоль.

Используя формулу (1.21), определим

$$R_{\text{ДГС}} = \frac{1}{\frac{0{,}0065}{259{,}83} + \frac{0{,}0017}{296{,}8} + \frac{0{,}9918}{2077{,}2}} = 1967{,}845\ \text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$$

Вычислим молекулярную массу смеси по формуле (1.22)

$$\mu_{\text{ДГС}} = \frac{8314}{1967{,}845} = 4{,}2249\ \text{кг/кмоль},$$

а по формуле (1.24) получим

$$\mu_{\text{ДГС}} = 0{,}0065\cdot 31{,}9988 + 0{,}0017\cdot 28{,}0134 + 0{,}9918\cdot 4{,}0026 = 4{,}225\ \text{кг/кмоль}.$$

Массовые доли компонентов, согласно (1.15), определяются по формуле

$$g_i = \frac{R_{\text{см}}}{R_i} r_i:$$

$$g_{O_2} = \frac{1967{,}845}{259{,}83}\cdot 0{,}0065 = 0{,}04923; \quad g_{N_2} = \frac{1967{,}845}{296{,}8}\cdot 0{,}0017 = 0{,}01127;$$

$$g_{He} = \frac{1967{,}845}{2077{,}2}\cdot 0{,}9918 = 0{,}9396; \quad \sum_1^n g_i = 1{,}000.$$

Плотность ДГС

$$\rho_{\text{ДГС}} = \frac{p_{\text{ДГС}}}{R_{\text{ДГС}} T_{\text{ДГС}}} = \frac{6\,300\,000}{1967{,}845\cdot 298} = 10{,}7432\ \text{кг}/\text{м}^3,$$

а удельный объём

$$v_{\text{ДГС}} = \frac{1}{\rho_{\text{ДГС}}} = \frac{1}{10{,}7432} = 0{,}0931\ \text{м}^3/\text{кг}.$$

Для $V_{\text{ДГС}} = 1\ \text{м}^3$, $m_{\text{ДГС}} = 10{,}7432$ кг.

Масса компонентов

$$m_{O_2} = g_{O_2} m_{\text{ДГС}} = 0{,}0065\cdot 10{,}7432 = 0{,}06983\ \text{кг};$$

$$m_{N_2} = 0{,}0017\cdot 10{,}7432 = 0{,}01826\ \text{кг};$$

$$m_{He} = 0{,}9918\cdot 10{,}7432 = 10{,}6551\ \text{кг}.$$

Парциальные давления компонентов ДГС, согласно (1.26), будут равны

$$p_{O_2} = r_{O_2} p_{\text{ДГС}} = 0{,}0065\cdot 6\,300\,000 = 40\,950\ \text{Па};$$

$$p_{N_2} = 0{,}0017\cdot 6\,300\,000 = 10\,710\ \text{Па};$$

$$p_{He} = 0{,}9918\cdot 6\,300\,000 = 6\,248\,340\ \text{Па}.$$

1.3.7. Удельная теплоёмкость газовой смеси

Значения удельных теплоёмкостей газовых смесей определяются по следующим формулам:

– смесь газов задана массовыми долями

$$c_{v_{см}} = g_1 c_{v_1} + g_2 c_{v_2} + \ldots + g_n c_{v_n} = \sum_1^n g_i c_{v_i};$$
$$c_{p_{см}} = g_1 c_{p_1} + g_2 c_{p_2} + \ldots + g_n c_{p_n} = \sum_1^n g_i c_{p_i}; \quad (1.27)$$

– смесь газов задана объёмными долями

$$c'_{v_{см}} = r_1 c'_{v_1} + r_2 c'_{v_2} + \ldots + r_n c'_{v_n} = \sum_1^n r_i c'_{v_i};$$
$$c'_{p_{см}} = r_1 c'_{p_1} + r_2 c'_{p_2} + \ldots + r_n c'_{p_n} = \sum_1^n r_i c'_{p_i}. \quad (1.28)$$

1.3.8. Энтальпия идеальной газовой смеси

Аддитивность объёма и внутренней энергии идеальной газовой смеси предопределяет это свойство и для энтальпии смеси

$$H_{см} = H_1 + H_2 + \ldots + H_n = \sum_1^n H_i.$$

Тогда для удельных величин энтальпии

$$h_{см} = g_1 h_1 + g_2 h_2 + \ldots + g_n h_n = \sum_1^n g_i h_i. \quad (1.29)$$

1.3.9. Энтропия идеальной газовой смеси

Энтропия идеальной газовой смеси равна сумме энтропий отдельных газов, соответствующих температуре и объёму смеси,

$$S_{см} = S_1 + S_2 + \ldots + S_n = \sum_1^n S_i.$$

Удельная энтропия идеальной газовой смеси равна сумме удельных энтропий чистых компонентов, подсчитанных при температуре смеси и парциальных давлениях компонентов смеси,

$$s_{см} = g_1 s_1 + g_2 s_2 + \ldots + g_n s_n = \sum_1^n g_i s_i. \quad (1.30)$$

1.3.10. Эксергия идеальной газовой смеси

Удельная эксергия

$$e_{\text{см}} = g_1 e_1 + g_2 e_2 + \ldots + g_n e_n = \sum_1^n g_i e_i \,, \qquad (1.31)$$

где e_i – эксергия потока, определяемая по формуле (1.12).

1.4. Термодинамические процессы идеальных газов

К основным процессам, имеющим большое значение как для теоретических исследований, так и для практических расчётов, относятся:

– ***изохорный***, протекающий при постоянном объёме;

– ***изобарный***, протекающий при постоянном давлении;

– ***изотермический***, протекающий при постоянной температуре;

– ***адиабатный***, протекающий при отсутствии теплообмена с окружающей средой.

Кроме того, существует группа процессов, обобщающая при определённых условиях основные процессы. Эти процессы являются ***политропными*** и характеризуются постоянством удельной теплоёмкости в процессе.

Для всех процессов устанавливается общий метод исследования, который заключается в следующем:

– выводится уравнение процесса;

– устанавливается зависимость между основными параметрами рабочего тела (газа, газовой смеси) в начале и конце процесса;

– определяются: количество теплоты, участвующей в процессе, изменение энтальпии, энтропии, эксергии.

1.4.1. Изохорный процесс (v = const)

Из уравнения состояния идеального газа (1.4) при $v = \text{const}$ получаем

$$\frac{p}{T} = \frac{R}{v} = \text{const}\,.$$

Это соотношение называют законом Шарля, согласно которому при постоянном объёме давление газа изменяется прямо пропорционально абсолютным температурам

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

Участвующее в процессе количество теплоты

$$q_{1-2} = \bar{c}_v\Big|_{t_1}^{t_2}(t_2 - t_1). \qquad (1.32)$$

Изменение энтальпии

$$\Delta h_{1-2} = h_2 - h_1 = \bar{c}_p\Big|_{t_1}^{t_2}(t_2 - t_1). \qquad (1.33)$$

Изменение энтропии в процессе

$$\Delta s_{1-2} = s_2 - s_1 = \bar{c}_v\Big|_{t_1}^{t_2}\ln\frac{T_2}{T_1} = \bar{c}_v\Big|_{t_1}^{t_2}\ln\frac{p_2}{p_1}. \qquad (1.34)$$

Для определения изменения эксергии можно использовать следующую формулу:

$$\Delta e_{1-2} = e_2 - e_1 = (h_2 - h_1) - T_{\text{о.с}}(s_2 - s_1). \qquad (1.35)$$

Пример

Пример 1.12. В газовом баллоне объёмом $V = 0{,}2$ м^3 содержится кислород. При $t = 25$°С манометр показывал $p_1 = 500$ кПа. Определить массу, давление кислорода и изменение удельных значений энтальпии и энтропии, если температура воздуха в помещении, где находится баллон, повысилась до $t_2 = 50$°С.

Используя данные примеров 1.1 и 1.4, имеем

$$R_{O_2} = 259{,}75 \text{ Дж/(кг·К)},$$

при $t_1 = 25$°С

$$\bar{c}_{v_1} = 0{,}6566 \text{ кДж/(кг·К)};$$

при $t_2 = 50$°С

$$\bar{c}_{v_2} = 0{,}6584 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

Согласно закону Шарля, давление кислорода в баллоне повысится до значения

$$p_2 = \frac{T_2}{T_1}p_1 = \frac{323{,}15}{298{,}15}\cdot 500 = 542 \text{ кПа}.$$

По формуле (1.4) найдём массу кислорода

$$m_{O_2} = \frac{p_1 V}{R_{O_2} T_1} = \frac{500\,000 \cdot 0{,}2}{259{,}75 \cdot 298{,}15} = 1{,}291 \text{ кг}.$$

Изменения удельной энтальпии и энтропии соответственно будут равны

$$\Delta h = h_2 - h_1 = \bar{c}_{v_2} t_2 - \bar{c}_{v_1} t_1 = 0{,}6584 \cdot 50 - 0{,}6566 \cdot 25 = 16{,}51 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = \bar{c}_v \Big|_{25^\circ C}^{50^\circ C} \ln \frac{T_2}{T_1} = \frac{0{,}6584 \cdot 50 - 0{,}6566 \cdot 25}{50 - 25} \cdot \ln \frac{323{,}15}{298{,}15} = 0{,}053 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

1.4.2. Изобарный процесс (p = const)

Из уравнения состояния идеального газа будем иметь

$$\frac{v}{T} = \frac{R}{p} = \text{const}.$$

Это соотношение называют законом Гей-Люссака. В изобарном процессе объёмы одного и того же количества газа изменяются прямо пропорционально абсолютным температурам

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}.$$

Количество теплоты, участвующее в процессе, определяется из уравнения

$$q_{1-2} = \bar{c}_p \Big|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1), \qquad (1.36)$$

а изменение энтальпии по формуле

$$\Delta h_{1-2} = h_2 - h_1 = \bar{c}_p \Big|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1). \qquad (1.37)$$

Следовательно,

$$q_{1-2} = \Delta h_{1-2}.$$

Изменение энтропии

$$\Delta s_{1-2} = s_2 - s_1 = \bar{c}_p \Big|_{t_1}^{t_2} \ln \frac{T_2}{T_1} = \bar{c}_p \Big|_{t_1}^{t_2} \ln \frac{v_2}{v_1}. \qquad (1.38)$$

Для определения изменения эксергии в изобарном процессе следует использовать формулу (1.35).

Пример

Пример 1.13. Массовый расход воздуха в подогревателе m = 10 кг/с при $t_1 = -25$°С. Температура воздуха на выходе из подогревателя $t_2 = 60$°С. Определить изменение энтальпии, энтропии и скорости воздуха, если принять, что процесс нагревания является изобарным, а живые сечения на входе и выходе аппарата одинаковы. Для расчёта принимаем плотность воздуха $\rho_1 = 1{,}29$ кг/м^3 при $t_1 = -25$°С, а удельную теплоёмкость постоянной и равной $\bar{c}_p = 1{,}005$ кДж/(кг·К).

Удельный объём воздуха при $t_1 = -25$°С

$$v_1 = \frac{1}{\rho_1} = 0{,}7752 \text{ м}^3/\text{кг};$$

объёмный расход

$$V_1 = \frac{m}{\rho_1} = \frac{10}{1{,}29} = 7{,}752 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Согласно закону Гей-Люссака, удельный объём воздуха на выходе при $t_1 = 60$°С

$$v_2 = v_1 \frac{T_2}{T_1} = 0{,}7752 \cdot \frac{333{,}15}{248{,}15} = 1{,}0407 \text{ м}^3/\text{кг},$$

а плотность

$$\rho_2 = \frac{1}{v_2} = 0{,}9609 \text{ кг/м}^3 .$$

Объёмный расход воздуха на выходе из подогревателя

$$V_2 = \frac{m}{\rho_2} = \frac{10}{0{,}9609} = 10{,}407 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Так как скорость воздуха в живом сечении пропорциональна объёмному расходу, то $\frac{w_2}{w_1} = \frac{V_2}{V_1} = 1{,}342$ и скорость воздуха на выходе будет в 1,342 раза больше, чем на входе: $w_2 = 1{,}342 \cdot w_1$.

Изменение энтальпии

$$\Delta h = h_2 - h_1 = \bar{c}_p (t_2 - t_1) = 84{,}425 \text{ кДж/кг}.$$

Изменение энтропии

$$\Delta s = s_2 - s_1 = \bar{c}_p \ln \frac{T_2}{T_1} = \bar{c}_p \ln \frac{v_2}{v_1} = 0{,}296 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

1.4.3. Изотермический процесс (T = const)

Для изотермического процесса

$$pv = RT = \text{const}.$$

Тогда

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1},$$

т. е. при постоянной температуре объём газа изменяется обратно пропорционально его давлению (закон Бойля–Мариотта).

Количество теплоты

$$q_{1-2} = p_1 v_1 \ln\frac{v_2}{v_1}. \qquad (1.39)$$

Изменение энтальпии при $T = \text{const}$ $\Delta h_{1-2} = 0$, а изменение энтропии будет определяться из выражения

$$\Delta s_{1-2} = s_2 - s_1 = R\ln\frac{v_2}{v_1} = R\ln\frac{p_1}{p_2}. \qquad (1.40)$$

Изменение эксергии, учитывая, что $\Delta h_{1-2} = 0$,

$$\Delta e_{1-2} = e_2 - e_1 = T_{\text{о.с}}(s_1 - s_2). \qquad (1.41)$$

Пример

Пример 1.14. Процесс транспортирования воздуха по воздуховодам обычно считают изотермическим. Определить изменение энтропии и аэродинамическое сопротивление сети, если давление воздуха на входе p_1 = 103,87 кПа, а удельный объём воздуха изменился от v_1 = 0,83 м^3/кг до v_2 = 0,845 м^3/кг ($R_{\text{в}}$ = = 287 Дж/(кг·К)).

Согласно закону Бойля–Мариотта, давление воздуха на выходе

$$p_2 = p_1\frac{v_1}{v_2} = 103{,}87\cdot\frac{0{,}83}{0{,}845} = 102{,}026 \text{ кПа}.$$

Аэродинамическое сопротивление сети

$$\Delta p = p_1 - p_2 = 1{,}844 \text{ кПа}.$$

Изменение удельной энтропии определяется по формуле

$$\Delta s = s_2 - s_1 = R_{\text{в}}\ln\frac{p_1}{p_2} = R_{\text{в}}\ln\frac{v_2}{v_1} = 287\ln\frac{103{,}87}{102{,}026} = 5{,}141 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}.$$

1.4.4. Адиабатный процесс (dq = 0 и q = 0)

Адиабатный процесс протекает при отсутствии теплообмена между термодинамической системой и окружающей средой.

Уравнение адиабаты имеет вид

$$pv^k = \text{const}.$$

При адиабатном процессе произведение давления на удельный объём газа в степени k есть величина постоянная. Величину k называют показателем адиабаты и для идеального газа $k = c_p/c_v$.

Так как $c_p > c_v$, то $k > 1$.

Связь параметров p и v для адиабаты имеет вид

$$p_1 v_1^k = p_2 v_2^k = \text{const}. \qquad (1.42)$$

Для v и T

$$T_1 v_1^{k-1} = T_2 v_2^{k-1} = \text{const}. \qquad (1.43)$$

Для p и T

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{k}{k-1}}, \quad \text{или} \quad \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \frac{T_2}{T_1}. \qquad (1.44)$$

Так как в адиабатном процессе $q = 0$, то энтропия системы не изменяется и $s = \text{const}$.

1.4.5. Политропный процесс

Всякий процесс идеального газа, в котором теплоёмкость является постоянной величиной, называют политропным.

Уравнением политропного процесса является выражение

$$pv^n = \text{const}. \qquad (1.45)$$

Теплоёмкость политропного процесса определяется по формуле

$$c_{\text{п}} = c_v \frac{n-k}{n-1}. \qquad (1.46)$$

Показатели политропы n и теплоёмкости $c_{\text{п}}$ принимают для каждого из термодинамических процессов определённое значение:

– изохорного: $n = \pm\infty$ и $c_{\text{п}} = c_v$;

– изобарного: $n = 0$ и $c_{\text{п}} = kc_v = c_p$;

– изотермического: $n = 1$ и $c_{\text{п}} = \pm\infty$;

– адиабатного: $n = k$ и $c_{\text{п}} = 0$.

Изменение теплоты в политропном процессе имеет следующий вид:

$$q = c_{\text{п}}(t_2 - t_1) = c_v \frac{n-k}{n-1}(t_2 - t_1).$$

Изменение энтальпии

$$h_2 - h_1 = c_v \frac{n-k}{n-1}(t_2 - t_1) + \frac{n}{n-1}(p_1 v_1 - p_2 v_2).$$

Изменение энтропии

$$s_2 - s_1 = c_{\text{п}} \ln \frac{T_2}{T_1} = c_v \frac{n-k}{n-1} \ln \frac{T_2}{T_1}.$$

2. Сухой воздух

Атмосферный воздух – это газообразная оболочка земли с постоянно убывающей по высоте концентрацией химически несвязанных и уникальных по своим свойствам компонентов. У поверхности земли состав сухого воздуха по основным компонентам практически не изменяется.

Сухой воздух, как один из компонентов влажного воздуха, сам является газовой смесью.

2.1. Состав сухого воздуха

Состав сухого атмосферного воздуха, рекомендуемый различными источниками [1, 2, 3, 4, 5, 6], отличается, хотя и незначительно, друг от друга. Некоторые авторы рекомендуют учитывать только два компонента сухого воздуха – азот и кислород [3].

В табл. 2.1 приведен рекомендуемый в [5, 6] состав чистого атмосферного сухого воздуха, полученный сопоставлением результатов химических анализов, пробы для которых взяты в различных местах и в разное время, и соответствующий стандартному составу, принятому международным соглашением в 1947 г.

Таблица 2.1

Состав чистого сухого атмосферного воздуха

Компоненты сухого воздуха	Химическая формула	Объёмная доля r_i, %	Массовая доля g_i, %	Общая оценочная масса в атмосфере, кг
Азот	N_2	78,087	75,52	$3840{,}19\cdot10^{15}$
Кислород	O_2	20,95	23,15	$1177{,}18\cdot10^{15}$
Аргон	Ar	0,93	1,282	$65{,}19\cdot10^{15}$
Двуокись углерода (углекислый газ)	CO_2	0,03	0,046	$2{,}34\cdot10^{15}$
Неон	Ne	$18\cdot10^{-4}$	$12{,}5\cdot10^{-4}$	$63{,}56\cdot10^{12}$
Гелий	He	$5{,}24\cdot10^{-4}$	$0{,}72\cdot10^{-4}$	$3{,}66\cdot10^{12}$
Ацетилен	C_2H_2	$2{,}03\cdot10^{-4}$	$1{,}28\cdot10^{-4}$	$6{,}51\cdot10^{12}$
Метан	CH_4	$1{,}5\cdot10^{-4}$	$0{,}8\cdot10^{-4}$	$4{,}07\cdot10^{12}$
Криптон	Kr	$1{,}14\cdot10^{-4}$	$3{,}3\cdot10^{-4}$	$16{,}72\cdot10^{12}$
Водород	H_2	$0{,}5\cdot10^{-4}$	$0{,}035\cdot10^{-4}$	$0{,}18\cdot10^{12}$
Закись азота	N_2O	$0{,}5\cdot10^{-4}$	$0{,}8\cdot10^{-4}$	$4{,}07\cdot10^{12}$
Ксенон	Xe	$0{,}08\cdot10^{-4}$	$0{,}36\cdot10^{-4}$	$1{,}83\cdot10^{12}$
Сухой воздух		≈ 100	≈ 100	$5085{,}00\cdot10^{15}$

Следует отметить, что на долю двух компонентов (кислород и азот) приходится 99,037% объёма и 98,670% массы сухого воздуха. На остальные десять компонентов соответственно 0,963% объёма и 1,33% массы.

В табл. 2.1 дан состав чистого воздуха. В атмосферном воздухе часто присутствуют и другие газовые примеси, концентрация которых подвержена сезонным и даже суточным изменениям. Присутствие газовых примесей зависит от метеорологических условий, топографии местности, расположения крупных промышленных предприятий и т. д.

Значения газовых постоянных и мольной массы компонентов сухого воздуха приведены в табл. 2.2 [2, 7].

Таблица 2.2

Газовые постоянные и мольные массы компонентов чистого сухого атмосферного воздуха [2, 7]

Компоненты сухого воздуха	Химическая формула	Газовая постоянная R, Дж/(кг·К)	Мольная масса μ, кг/кмоль
Азот	N_2	296,80	28,0134
Кислород	O_2	259,83	31,9988
Аргон	Ar	208,13	39,9480
Двуокись углерода (углекислый газ)	CO_2	188,92	44,0099
Неон	Ne	411,90	20,1830
Гелий	He	2077,20	4,0026
Ацетилен	C_2H_2	319,31	26,0400
Метан	CH_4	518,25	16,0430
Криптон	Kr	99,22	83,8000
Водород	H_2	4124,40	2,0159
Закись азота	N_2O	188,91	44,0128
Ксенон	Xe	63,32	131,3000

Задачей расчёта газовых смесей, в том числе и сухого воздуха, является определение газовой постоянной, молекулярной массы, парциальных давлений компонентов, плотности и удельного объёма, удельных теплоёмкостей и других величин на основе заданного состава смеси.

Для сухого воздуха определение указанных величин целесообразно проводить на основе уравнений и соотношений для идеального газа. Такой подход оправдан тем, что отклонение поведения сухого воздуха при рассматриваемых нами давлениях и температурах для систем комфортного кондиционирования воздуха незначительно по сравнению с поведением идеального газа. Это подтверждается данными, приведенными в [2], где дана зависимость фактора сжимаемости $Z = pV/(RT)$ сухого воздуха от температуры (для идеального газа $Z = 1$) при p =100 кПа.

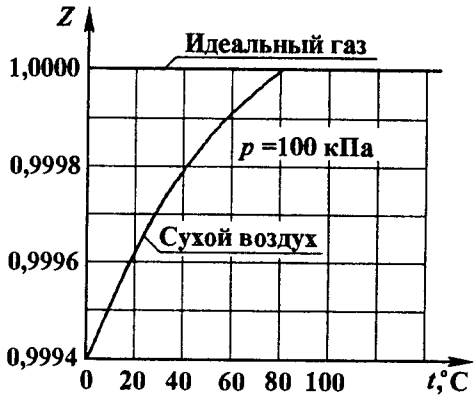


Рис. 2.1. Зависимость фактора сжимаемости Z для сухого воздуха от температуры (p = 100 кПа)

Как видно из рис. 2.1, отклонение величины Z в диапазоне температур от 0 до 80°С не превышает 0,06%.

Важно не только рассчитать указанные величины, но и определить их отклонение от истинных значений для интересующего нас диапазона температур и давлений. Как уже отмечалось ранее, для систем кондиционирования можно ограничиться диапазоном температур окружающего воздуха от минус 50 до 50°С. При тепловой обработке воздуха в аппаратах систем кондиционирования воздуха (СКВ) предельные значения обычно равны: при охлаждении – не ниже 0°С и при нагревании – не выше 50°С. Поэтому указанный выше диапазон температур является достаточным.

Атмосферное давление не является постоянной величиной, поскольку зависит от погоды, температуры и высоты места над уровнем моря.

Атмосферное давление определяют по формуле

$$p = p_0 + \Delta p_н + \Delta p_с,$$

где p_0 – постоянное давление, определяемое высотой места над уровнем моря; $\Delta p_н$ – непериодическое изменение, связанное с изменением погоды; $\Delta p_с$ – периодическое изменение (суточный ход).

Непериодическое изменение атмосферного давления $\Delta p_н$ вследствие изменения погоды составляет ±7% от среднего значения давления [8]. Величина $\Delta p_с$ имеет амплитуду колебаний от 300 до 400 Па [9]. Давление атмосферного воздуха над уровнем моря равно 101 325 Па. Тогда максимальное давление воздуха p_{max} = 101 325 + + 7092,7 + 400 = 108 817,7 Па, а минимальное p_{min} = 101 325 – – 7092,7 – 400 = 93 832,3 Па, т. е. возможный диапазон изменения давления атмосферного воздуха лежит в пределах от 94 до 109 кПа.

Если учесть, что в СКВ устанавливаются вентиляторы с напором не более 6000 Па, то максимально возможное давление обрабатываемого воздуха не будет превышать 115 кПа. Поэтому интересующий нас диапазон изменения давления воздуха лежит в пределах от 94 до 115 кПа.

2.2. Газовая постоянная и мольная масса сухого воздуха

Газовая постоянная $R_{с.в}$ и мольная масса $\mu_{с.в}$, рассчитанные по формулам (1.20) и (1.24),

$$R_{с.в} = \sum_{i}^{n} g_i R_i = 287{,}06 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}), \quad \mu_{с.в} = \sum_{i}^{n} r_i \mu_i = 28{,}964 \text{ кг/кмоль}.$$

Сравнивая полученные результаты со значениями этих величин, приведёнными в [7], имеем практически их полное совпадение.

2.3. Плотность и удельный объём сухого воздуха

Плотность сухого воздуха $\rho_{с.в}$ и его удельный объём $v_{с.в}$ можно определить из уравнения Клапейрона: $\rho_{с.в} = p_{с.в}/(R_{с.в}T_{с.в})$ и $v_{с.в} = 1/\rho_{с.в}$.

Из уравнения следует, что указанные величины зависят от температуры и давления смеси.

В табл. 2.3 приведены значения плотности сухого воздуха для различных значений температур и давлений, вычисленные по уравнению Клапейрона.

Таблица 2.3

Плотность сухого воздуха

Температура		Плотность $\rho_{с.в}$, кг/м^3, при давлении $p_{с.в}$, кПа				
К	°С	90	95	100	105	110
223,15	–50	1,4050	1,4830	1,5611	1,6391	1,7172
233,15	–40	1,3435	1,4081	1,4941	1,5674	1,6420
243,15	–30	1,2894	1,3611	1,4327	1,5043	1,5760
253,15	–20	1,2385	1,3073	1,3761	1,4449	1,5137
263,15	–10	1,1914	1,2576	1,2753	1,3900	1,4562
273,15	0	1,1478	1,2116	1,3238	1,3391	1,4029
283,15	10	1,1073	1,1688	1,2303	1,2918	1,3535
293,15	20	1,0695	1,1289	1,1883	1,2477	1,3072
303,15	30	1,0342	1,0917	1,1491	1,2066	1,2640
313,15	40	1,0012	1,0568	1,1124	1,1681	1,2237
323,15	50	0,9702	1,0241	1,0780	1,1319	1,1858

2.4. Удельная теплоёмкость сухого воздуха

Удельные теплоёмкости идеальных газов $\bar{c}_p$ и $\bar{c}_v$ в общем случае представляют собой сложные функции температуры. На рис. 2.2 представлено соотношение для некоторых газов, входящих в состав сухого воздуха, в зависимости от температуры.

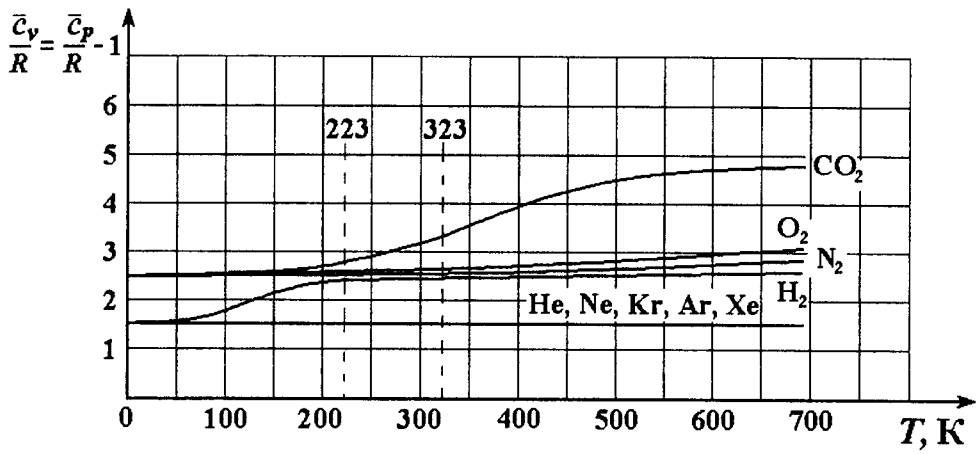


Рис. 2.2. Зависимости $\frac{\bar{c}_v}{R} = \frac{\bar{c}_p}{R} - 1$ для различных газов от температуры

Как видно из рисунка, только у одноатомных инертных газов удельные теплоёмкости не зависят от температуры и имеют постоянное значение. Для указанных газов справедливо соотношение

$$\bar{c}_p = \frac{2}{5}R \quad \text{и} \quad \bar{c}_v = \frac{3}{2}R. \tag{2.1}$$

Значения удельных теплоёмкостей инертных газов, вычисленные по формулам (2.1), даны в табл. 2.4. Там же приведены значения удельной теплоёмкости $\bar{c}_p$, указанные в [2].

Для интересующего нас диапазона температур остаются практически постоянными и удельные теплоёмкости двухатомных газов: кислорода O_2, азота N_2 и водорода H_2.

Удельные теплоёмкости указанных газов можно определить по формулам

$$\bar{c}_p = \frac{7}{2}R \quad \text{и} \quad \bar{c}_v = \frac{5}{2}R. \tag{2.2}$$

Таблица 2.4

Удельная теплоёмкость инертных газов

Химическая формула	Удельная теплоёмкость $\bar{c}$, кДж/(кг·К)		
	$\bar{c}_v$	$\bar{c}_p$	
		По формулам (2.1)	По данным [2] при $t = 25$°С
He	3,116	5,193	5,2399
Ne	0,618	1,030	1,0325
Kr	0,149	0,248	0,2488
Ar	0,312	0,520	0,5215
Xe	0,095	0,158	0,1587

Для двухатомных газов значения удельных теплоёмкостей приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Удельная теплоёмкость двухатомных газов

Химическая формула	Удельная теплоёмкость $\bar{c}$, кДж/(кг·К)		
	$\bar{c}_v$	$\bar{c}_p$	
		По формулам (2.2)	По данным [2, 7] при $t = 25$°С
N_2	0,742	1,0388	1,0387
O_2	0,6496	0,9094	0,9164
H_2	10,311	14,435	14,340

Удельная теплоёмкость остальных компонентов сухого воздуха (CO_2, C_2H_2, CH_4 и N_2O) имеет ярко выраженную зависимость от температуры (см. рис 2.2 – для CO_2). Для них могут быть рекомендованы линейные зависимости типа $c = a + bt$. Например, для углекислого газа [10]

$$\bar{c}_p = 0{,}8727 + 0{,}0002406t, \quad \bar{c}_v = 0{,}6837 + 0{,}002406t.$$

Масса указанных компонентов в сухом воздухе составляет всего 0,046%. Влияние на удельную теплоемкость смеси в зависимости от температуры практически незаметно. Поэтому можно рекомендовать для этих компонентов принимать в расчётах среднее значение удельной теплоемкости при температуре $t = 25$°С.

Эти значения приведены в табл. 2.6.

Таблица 2.6

Удельная теплоёмкость газа

Химическая формула	Удельная теплоёмкость $\bar{c}$, кДж/(кг·К), при $t = 25°$ С	
	$\bar{c}_v$	$\bar{c}_p$
CO_2	0,6408	0,8297
C_2H_2	1,3180	1,6373
CH_4	1,7276	2,2459
N_2O	0,6907	0,8796

При принятых допущениях определение удельной теплоемкости сухого воздуха для диапазона температур от минус 50 до 50°С с учётом массовых долей компонентов по формулам (1.27) и (1.28) даёт следующий результат:

– средняя массовая удельная теплоемкость при постоянном давлении

$$\bar{c}_p = 1{,}0021 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

– средняя массовая удельная теплоемкость при постоянном объеме

$$\bar{c}_v = 0{,}7150 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

– средняя объемная удельная теплоемкость при постоянном давлении

$$\bar{c}'_p = 1{,}2949 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К});$$

– средняя объемная удельная теплоемкость при постоянном объеме

$$\bar{c}'_v = 0{,}9239 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

2.5. Парциальные давления компонентов сухого воздуха

Парциальные давления газов, входящих в состав сухого воздуха, зависят от давления смеси и могут быть определены через массовые доли компонентов по формуле (1.25) или объёмные доли по формуле (1.26).

В табл. 2.7 приведены парциальные давления всех компонентов сухого воздуха при нормальном давлении $p_{\text{с.в}} = 101{,}325$ кПа.

Таблица 2.7

Парциальные давления компонентов сухого воздуха

Компоненты	p, кПа
p_{N_2}	78,983
p_{O_2}	21,196
p_{Ar}	0,940
p_{CO_2}	0,0306
p_{Ne}	0,182
p_{He}	$0{,}53\cdot10^{-3}$
$p_{C_2H_2}$	$0{,}14\cdot10^{-3}$
p_{CH_4}	$0{,}15\cdot10^{-3}$
p_{Kr}	$0{,}11\cdot10^{-3}$
p_{H_2}	$0{,}051\cdot10^{-3}$
p_{N_2O}	$0{,}053\cdot10^{-3}$
p_{Xe}	$0{,}008\cdot10^{-3}$
$p_{с.в}$	101,332

2.6. Энтальпия, энтропия и эксергия сухого воздуха

Удельную энтальпию сухого воздуха при различных температурах можно определить по формуле (1.8)

$$h_{с.в} = \bar{c}_{p_{с.в}} t. \qquad (2.3)$$

В табл. 2.8 приведены значения удельной энтальпии сухого воздуха для диапазона температур от минус 50 до 50°С.

Удельная этропия сухого воздуха, согласно (1.10), зависит от температуры и давления

$$s_{с.в} = \bar{c}_{p_{с.в}} \ln\frac{T_{с.в}}{273{,}15} - R_{с.в} \ln\frac{p_{с.в}}{101\,325}. \qquad (2.4)$$

В табл. 2.9 приведены значения удельной энтропии сухого воздуха для диапазона температур от минус 50 до 50°С при различном давлении.

Таблица 2.8

Удельная энтальпия сухого воздуха

Температура t, °С	Удельная энтальпия $h_{с.в}$, кДж/кг	
	По формуле (2.3)	По данным [11]
– 50	– 50,105	–
– 40	– 40,084	– 40,11
– 30	– 30,063	– 30,09
– 20	– 20,042	– 20,06
– 10	– 10,021	– 10,03
0	0	0
10	10,021	10,03
20	20,042	20,07
30	30,063	30,11
40	40,084	40,16
50	50,105	50,21

Таблица 2.9

Удельная энтропия сухого воздуха

Температура t,°С		Удельная энтропия $s_{с.в}$, кДж/(кг·К), при давлении $p_{с.в}$, кПа				
К	°С	90	95	101,325	105	110
223,15	– 50	– 0,1686	– 0,01842	– 0,2026	– 0,2129	– 0,2263
243,15	– 30	– 0,0826	– 0,0982	– 0,1166	– 0,1268	– 0,1403
263,15	– 10	– 0,00335	– 0,0190	– 0,03737	– 0,0476	– 0,0610
273,15	0	0,0340	0,0184	0	– 0,0102	– 0,0237
283,15	10	0,070	0,054	0,03603	0,0258	0,0123
303,15	30	0,1384	0,1228	0,1044	0,0942	0,0807
323,15	50	0,2024	0,1868	0,1684	0,1582	0,1447

Удельная эксергия сухого воздуха, согласно (1.12) и (1.31), может быть определена из выражения

$$e_{с.в} = (h_{с.в} - h_{о.с}) - T_{о.с}(s_{с.в} - s_{о.с}). \qquad (2.5)$$

Имея в виду, что

$h_{с.в} = \bar{c}_{p_{с.в}} t_{с.в}$,

$$s_{с.в} = \bar{c}_{p_{с.в}} \ln\frac{T_{с.в}}{273{,}15} - R_{с.в} \ln\frac{p_{с.в}}{101\,325},$$

$h_{о.с} = \bar{c}_{p_{с.в}} t_{о.с}$,

$$s_{о.с} = \bar{c}_{p_{с.в}} \ln\frac{T_{о.с}}{273{,}15} - R_{с.в} \ln\frac{p_{о.с}}{101\,325},$$

получим окончательный вид формулы для определения удельной эксергии сухого воздуха

$$e_{\text{с.в}} = \bar{c}_{p_{\text{с.в}}}(T_{\text{с.в}} - T_{\text{о.с}}) - T_{\text{о.с}}\left(\bar{c}_{p_{\text{с.в}}} \ln\frac{T_{\text{с.в}}}{T_{\text{о.с}}} - R_{\text{с.в}} \ln\frac{p_{\text{с.в}}}{p_{\text{о.с}}}\right). \quad (2.6)$$

При этом необходимо знать термодинамические параметры состояния сухого воздуха, являющегося рабочим телом, и сухого воздуха в окружающей среде.

Приведённые в разделе 2 таблицы и графики позволяют быстро и достаточно точно найти необходимые значения плотности, удельного объёма, энтальпии и энтропии сухого воздуха в зависимости от температуры и давления. Физические свойства сухого воздуха для диапазона температур от минус 50 до 50°С даны в приложении (табл. 1).

Примеры

Пример 2.1. Наружный сухой воздух с $t_{\text{о.с}} = -30$°С и $p_{\text{о.с}} = 95$ кПа обрабатывается в кондиционере и подаётся в помещение, где поддерживаются $t = 30$°С и $p = 101{,}325$ кПа. Определить: плотность, удельный объём, энтальпию, энтропию и эксергию сухого воздуха в помещении.

Плотность сухого воздуха в помещении

$$\rho = \frac{p}{R_{\text{с.в}} T} = \frac{101\,325}{287{,}06 \cdot 303{,}15} = 1{,}164 \text{ кг/м}^3;$$

удельный объём

$$v = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{1{,}164} = 0{,}859 \text{ м}^3/\text{кг};$$

энтальпия

$$h = \bar{c}_{p_{\text{с.в}}} = 1{,}0021 \cdot 30 = 30{,}063 \text{ кДж/кг};$$

энтропия

$$s = \bar{c}_{p_{\text{с.в}}} \ln\frac{T}{273{,}15} - R_{\text{с.в}} \ln\frac{p}{101\,325} = 1{,}0021 \ln\frac{303{,}15}{273{,}15} = 0{,}1044 \text{ кДж / кг};$$

эксергия

$$e = \bar{c}_{p_{\text{с.в}}}\left(T - T_{\text{о.с}}\right) - T_{\text{о.с}}\left(\bar{c}_{p_{\text{с.в}}} \ln\frac{T}{T_{\text{о.с}}} - R_{\text{с.в}} \ln\frac{p}{p_{\text{о.с}}}\right) =$$

$$= 1{,}0021(303{,}15 - 243{,}15) - 243{,}15\left(1{,}0021 \ln\frac{303{,}15}{243{,}15} - 0{,}28706 \ln\frac{101\,325}{95000}\right) =$$

$$= 10{,}8173 \text{ кДж/кг}.$$

3. Вода

3.1. Общие положения

Вода, как и любое другое вещество, может находиться в твёрдом (лёд), жидком (вода) и газообразном (пар) состояниях, а в зависимости от соотношения давления и температуры – одновременно в двух и даже трёх состояниях.

Таким образом, вода может быть гомогенной системой (лёд, вода, пар) и гетерогенной системой (пар – вода, вода – лёд, пар – лёд, пар – вода – лёд).

Каждая гомогенная часть гетерогенной системы, ограниченная поверхностью раздела и характеризующаяся одинаковыми физическими свойствами во всех своих точках, называется ***фазой***.

Таким образом, гетерогенная система состоит из отдельных гомогенных подсистем.

Фазовый переход есть переход вещества из одной фазы в другую через поверхность раздела фаз.

Переход вещества из твёрдого состояния в жидкое называют ***плавлением***, из твёрдого в газообразное – ***сублимацией***, из жидкого в газообразное – ***парообразованием***. Обратные процессы соответственно называют ***затвердеванием***, ***десублимацией*** и ***конденсацией***.

В свою очередь, процесс парообразования реализуется в двух формах:

– ***испарение*** на свободной поверхности жидкости;

– ***кипение*** на свободной поверхности и внутри жидкости путем образования паровых пузырей.

В гетерогенных областях, находящихся в термодинамическом равновесии, фазы имеют одинаковые давление и температуру. Однако, удельные параметры состояния, например, v, m или s для каждой из фаз различны. Состояние в двух– или трёхфазной области не может быть определено заданием давления p и температуры T, так как оба эти параметра здесь однозначно взаимосвязаны. Состояние гетерогенной системы определяется, если известен её состав, т. е. соотношение количеств вещества фаз.

Сформулируем условия термодинамического равновесия двухфазной однокомпонентной системы (например, вода – пар) массой m для $p = \text{const}$ и $T = \text{const}$.

Объединённое выражение первого и второго законов термодинамики

$$T\mathrm{d}S \geq \mathrm{d}U + p\mathrm{d}V$$

путём тождественных преобразований может быть записано в следующем виде:

$$\mathrm{d}G \leq -S\mathrm{d}T + V\mathrm{d}p, \tag{3.1}$$

где функция

$$G = H - TS \tag{3.2}$$

называется ***энергией Гиббса***, или ***изобарно-изотермическим потенциалом***.

Применительно к рассматриваемой системе, для которой p = = const и T = const, а, следовательно, $\mathrm{d}p = 0$ и $\mathrm{d}T = 0$, имеем следующее условие: $\mathrm{d}G \leq 0$.

Самопроизвольный процесс стремления изобарно-изотермической системы к равновесию необратим и сопровождается уменьшением изобарного потенциала, т. е. $\mathrm{d}G < 0$. При достижении системой состояния термодинамического равновесия изобарный потенциал получает минимальное значение для определённых p и T. Достаточным условием минимума функции $G = G(p, T)$ является условие: $\mathrm{d}G = 0$ и $\mathrm{d}^2G > 0$.

Изобарный потенциал G является экстенсивной величиной. Удельный изобарный потенциал называют ***химическим потенциалом*** и обозначают μ.

В рассматриваемой двухфазной системе каждая фаза характеризуется своими удельными параметрами. Так, кипящая жидкость массой m' имеет параметры h', s', μ' и др.; сухой насыщенный пар массой m''– параметры h'', s'', μ'' и др.

Энтропия и энтальпия системы определяются формулами

$$S = s'm' + s''m'', \quad H = h'm' + h''m''.$$

Изобарный потенциал системы связан с химическими потенциалами фаз формулой

$$G = \mu'm' + \mu''m''.$$

В условиях термодинамического равновесия ($\mathrm{d}\,G = 0$) имеем

$$\mathrm{d}\,G = \mu'\,\mathrm{d}\,m' + \mu''\,\mathrm{d}\,m'' = 0, \tag{3.3}$$

где $\mu' = h' - Ts'$ и $\mu'' = h'' - Ts''$ являются постоянными величинами для заданных p и T.

Масса двухфазной системы m может различным образом распределяться между фазами, но всегда сохраняет одно и то же значение $m = m' + m''$, т. е. $dm = 0$, а, следовательно, и $dm' = -dm''$, например, уменьшение массы воды равно увеличению массы пара. Поэтому из выражения (3.3) следует, что

$$\mu' = \mu'', \tag{3.4}$$

т. е. химические потенциалы сосуществующих фаз в условиях термодинамического равновесия равны между собой. В силу предварительно принятого условия p = const и T = const соблюдаются также равновесия:

– термическое

$$T' = T''; \tag{3.5}$$

– механическое

$$p' = p''. \tag{3.6}$$

Таким образом, равенства (3.4) – (3.6) являются условиями термодинамического равновесия двухфазной однокомпонентной системы.

При нарушении условия (3.4) начнётся переход массы в фазу с меньшим химическим потенциалом.

Примеры

Пример 3.1. Построить зависимость химического потенциала воды в области фазового перехода при $p_н$ = 5 кПа от температуры и найти условия равенства химических потенциалов воды μ' и водяного пара μ''.

Из термодинамических таблиц свойств воды и перегретого пара [11] для давления p = 5 кПа находим значения температуры, энтальпии и энтропии.

Для воды:

t, °С	$h_в$, кДж/кг	$s_в$, кДж/(кг·К)
10	42	0,151
20	83,9	0,2963
30	125,7	0,4365

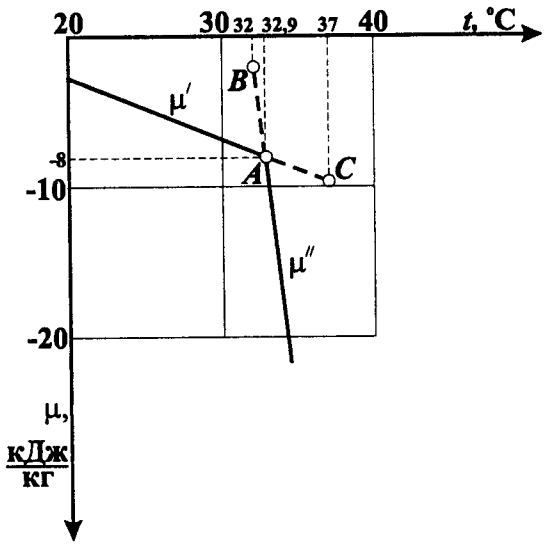
Для перегретого пара:

t, °C	$h_п$, кДж/кг	$s_п$, кДж/(кг·К)
40	2574,6	8,4385
50	2593,4	8,4977
60	2612,3	8,5552

По формуле $\mu = h - Ts$ вычисляем значения химического потенциала:

t, °C	μ, кДж/кг
10	–0,756
20	–2,96
30	–6,625
40	–67,92
50	–152,63
60	–237,86

Зависимость химического потенциала от температуры представлена на графике, из которого видно, что равенство химических потенциалов $\mu' = \mu''$ (точка A) наступает при $t_н = 32{,}9$°C и $\mu = -8{,}0$ кДж/кг. Действительно, из термодинамических таблиц свойств воды и водяного пара в состоянии насыщения имеем: при $p_н = 5$ кПа $t_н = 32{,}9$°C. Для воды при $t_н = 32{,}9$°C $h' = 137{,}77$ кДж/кг и $s' = 0{,}4762$ кДж/(кг·К). Откуда $\mu' \cong 8{,}0$ кДж/кг. Для насыщенного пара $h'' = 2561{,}2$ кДж/кг и $s'' = 8{,}2952$ кДж/(кг·К). Следовательно, $\mu'' \cong 8{,}0$ кДж/кг. Левее точки A химический потенциал воды меньше химического потенциала пара, т. е. $\mu' < \mu''$. Так, например, если бы пар с температурой 32°C (точка B) находился в контакте с водой, имеющей ту же температуру, то условия теплового (3.5) и механического (3.6) равновесия соблюдались бы, но условие равенства химических потенциалов было бы нарушено. Это приводит к переходу вещества в фазу с меньшим значением химического потенциала, т. е. более устойчивую при данных условиях, поэтому переохлажденный пар должен сконденсироваться. Обратная картина будет иметь место для точки C.



Условия термодинамического равновесия (3.4) – (3.6) можно записать в виде уравнения $\mu'(p,T) = \mu''(p,T)$, из которого видно, что обе фазы имеют одинаковые давление и температуру. Давление $p_н$ и температура $T_н$ насыщенного пара в условиях фазового перехода связаны между собой, что позволяет найти уравнение кривой парообразования $p_н = f(T_н)$.

Для химического потенциала с учётом выражения (3.1)

$$d\mu' = -s'dT_н + v'dp_н, \quad d\mu'' = -s''dT_н + v''dp_н.$$

Так как изменения химического потенциала каждой фазы при переходе равны между собой, т. е. $d\mu' = d\mu''$, то

$$-s'dT_н + v'dp_н = -s''dT_н + v''dp_н.$$

Откуда

$$\frac{dp_н}{dT_н} = \frac{(s'' - s')}{(v'' - v')}.$$

Имея в виду, что теплота фазового перехода $r = T_н(s'' - s')$, окончательно получим

$$\frac{dp_н}{dT_н} = \frac{r}{T_н(v'' - v')}. \qquad (3.7)$$

Полученное уравнение связывает давление насыщения $p_н$ с температурой $T_н$ и носит название уравнения Клапейрона–Клаузиуса.

В основу вывода уравнения легли термодинамические положения, которые справедливы и для фазовых переходов вода – лёд и лёд – водяной пар. Следовательно, это уравнение справедливо в указанных случаях при замене r теплотой соответствующего фазового перехода, а объёмов жидкости и пара – объёмами соответствующих фаз. Каждый из трёх фазовых переходов является изобарным и изотермическим, поэтому значения теплоты перехода равны разности энтальпий фаз

$$h'' - h_л = (h'' - h') + (h' - h_л),$$

или

$$r_{суб} = r + r_{пл}. \qquad (3.8)$$

Количество теплоты, затрачиваемое на парообразование 1 кг воды при температуре кипения до сухого насыщенного пара, называется ***теплотой парообразования r***.

Следовательно,

$$r = h'' - h' = T_н(s'' - s') = T_н(v'' - v')\frac{dp_н}{dT_н}. \qquad (3.9)$$

Количество теплоты, которое необходимо затратить на плавление 1кг льда при температуре плавления, называется ***теплотой плавления*** $r_{пл}$.

Таким образом,

$$r_{пл} = h' - h_л = T_н(s' - s_л) = T_н(v' - v_л)\frac{dp_н}{dT_н}. \qquad (3.10)$$

Количество теплоты, которое необходимо затратить на сублимацию 1 кг льда при температуре сублимации, называется ***теплотой сублимации*** $r_{суб}$.

Откуда

$$r_{суб} = h'' - h_л = T_н(s'' - s_л) = T_н(v'' - v_л)\frac{dp_н}{dT_н}. \qquad (3.11)$$

Следует отметить, что вода по сравнению с другими жидкостями обладает аномальностью свойств. Максимальная плотность воды при нормальном давлении наблюдается при температуре 4°С.

У подавляющего большинства веществ объём твёрдой фазы меньше объёма жидкой фазы. Для воды объём льда больше, чем объём воды в момент фазового перехода, т. е. $v' - v_л < 0$.

Это и объясняет аномальный ход кривой затвердевания воды, когда с повышением давления температура затвердевания уменьшается. Действительно, из уравнения Клапейрона–Клаузиуса следует, что $\frac{dp_н}{dT_н} = \frac{r_{пл}}{T_н(v' - v_л)}$, но поскольку $r_{пл}$ и $T_н$ всегда положительны, а величина $(v' - v_л)$ для воды отрицательна, то производная $\frac{dp_н}{dT_н}$ будет меньше нуля. Это значит, что угол наклона касательной к линии затвердевания в p–t-диаграмме будет больше 90°, т. е. кривая с повышением давления будет отклоняться влево. Более подробно эти вопросы будут затронуты при рассмотрении области воды и плавления льда в s–t-диаграмме.

3.2. Фазовые диаграммы для воды

3.2.1. Фазовая p–t-диаграмма

На рис. 3.1 представлена фазовая *p–t*-диаграмма воды, имеющей плоскую поверхность раздела фаз. Равновесное состояние твёрдой и газообразной фаз соответствует кривой *AC*, жидкой и твёрдой фаз – кривой *AB*, а жидкой и парообразной фаз – кривой *АД*. На диаграмме приведены значения давлений для соответствующих значений температур.

Справа от кривой *САД* располагается область газообразной фазы воды (водяной пар), между кривыми *AB* и *АД* – жидкая фаза (вода), а слева от кривой *AB* – твёрдая фаза (лёд).

В тройной точке (точка *A*) вода может одновременно находиться в трёх фазах – твёрдой, жидкой и газообразной. Этой точке соответствуют давление $p = 0{,}61$ кПа и температура $t = 0{,}01$°С.

Если давление $p < 0{,}61$ кПа, то твёрдое тело (лёд) будет при нагревании непосредственно переходить в газообразное состояние, т. е. сублимировать. При $p > 0{,}61$ кПа лёд будет переходить в жидкое состояние, а при дальнейшем нагревании – в газообразное. Такой переход имеет место до критического давления $p = 22{,}14$ МПа и при температуре $t = 374{,}15$°С. В критической точке исчезает различие между жидкостью и паром. Выше критической точки существование воды в двухфазном состоянии невозможно.

Важно отметить, что при изменении давления температура кипения воды (кривая *АД*) и сублимации льда (кривая *AC*) также изменяется.

Каждому давлению соответствует определённая температура кипения воды и сублимации льда, называемая ***температурой насыщения***.

Каждой температуре соответствует определённое давление парообразования и сублимации, называемое ***давлением насыщения***.

Для воды при обычных давлениях температура плавления льда практически остаётся постоянной и равной $t_{пл} \approx 0°\,С$.

Для этих условий связь между давлением насыщенного водяного пара $p_н$, кПа, над плоской поверхностью воды или льда и температурой определяется формулой [12]

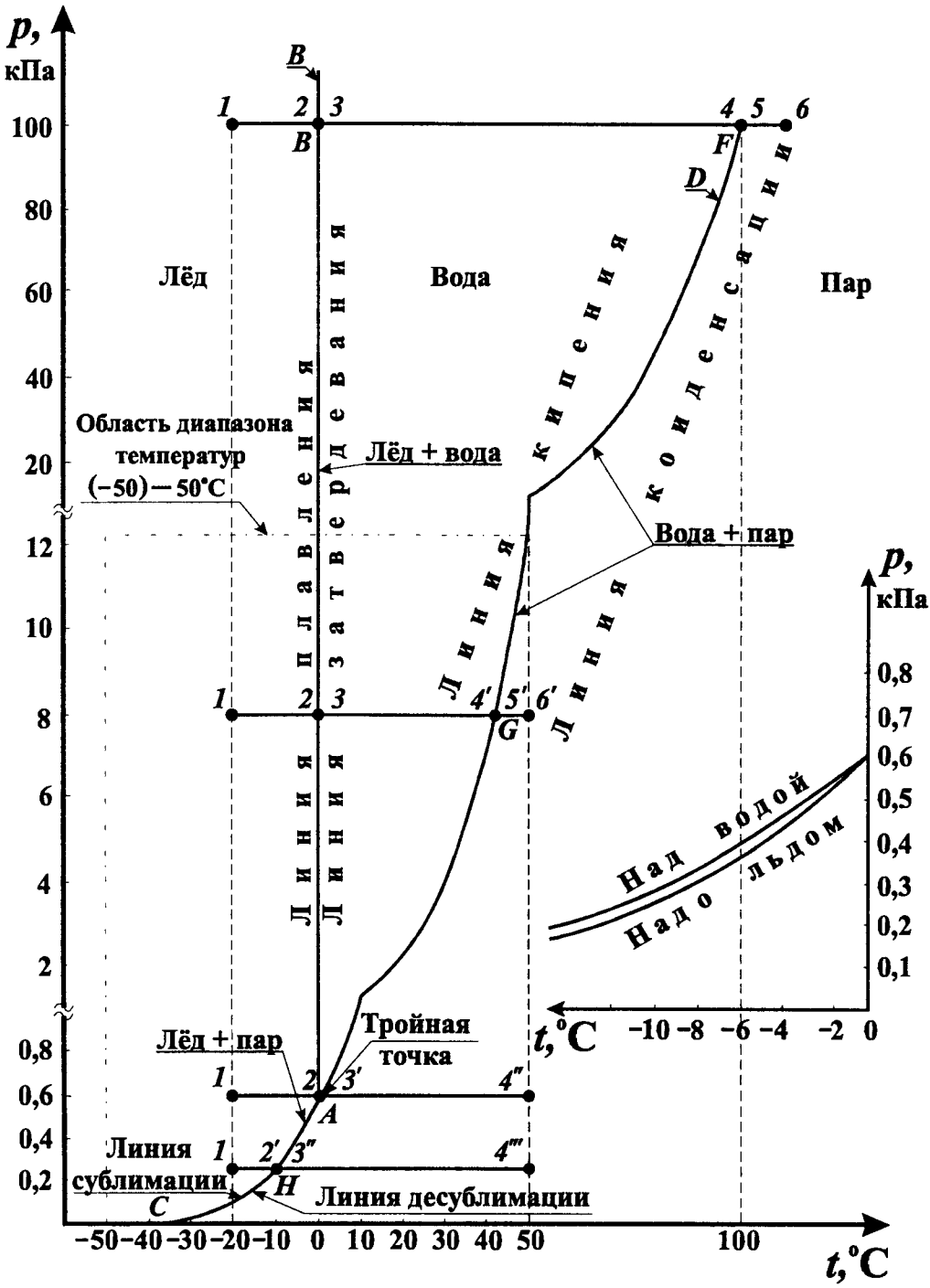


Рис. 3.1. Фазовое состояние воды

$$p_{\text{н}} = 0{,}6112 \exp\left[\frac{\alpha t}{\beta + t}\right], \qquad (3.12)$$

где $\alpha_{\text{в}}$, $\beta_{\text{в}}$ – постоянные для воды, $\alpha_{\text{в}} = 17{,}504$, $\beta_{\text{в}} = 241{,}2°\text{C}$;

$\alpha_{\text{л}}$, $\beta_{\text{л}}$ – постоянные для льда, $\alpha_{\text{л}} = 22{,}489$, $\beta_{\text{л}} = 272{,}88°\text{C}$;

t – температура плоской поверхности воды (льда), °С.

Погрешность этой зависимости относительно табличных данных [1] приведена в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Относительная погрешность

Температура, ° С	Относительная погрешность, %
Для льда	
– 50	0,071
– 40	0,086
– 30	0,071
– 20	0,029
– 10	– 0,019
0	0,084
Для воды	
10	– 0,013
20	– 0,092
30	– 0,121
40	– 0,078
50	0,047

На рис. 3.1 изображены также изобарные процессы нагревания (или охлаждения) при атмосферном давлении p = 101,3 кПа (процесс *1–2–3–4–5–6*), при давлении $p = 8$ кПа (процесс *1–2–3–4′–5′–6′*), при давлении p = 0,61 кПа (процесс *1–2–3′–4″*) и при давлении p = = 0,26 кПа (процесс *1–2′–3″–4‴*), которые показывают, как происходит процесс перехода воды из одной фазы в другую.

Для наглядности на рис. 3.2 в *v–t*-диаграмме (без соблюдения масштаба) приведено графическое изменение состояния воды при изменении температуры для тех же процессов, а на рис. 3.3 – их схематическое изображение.

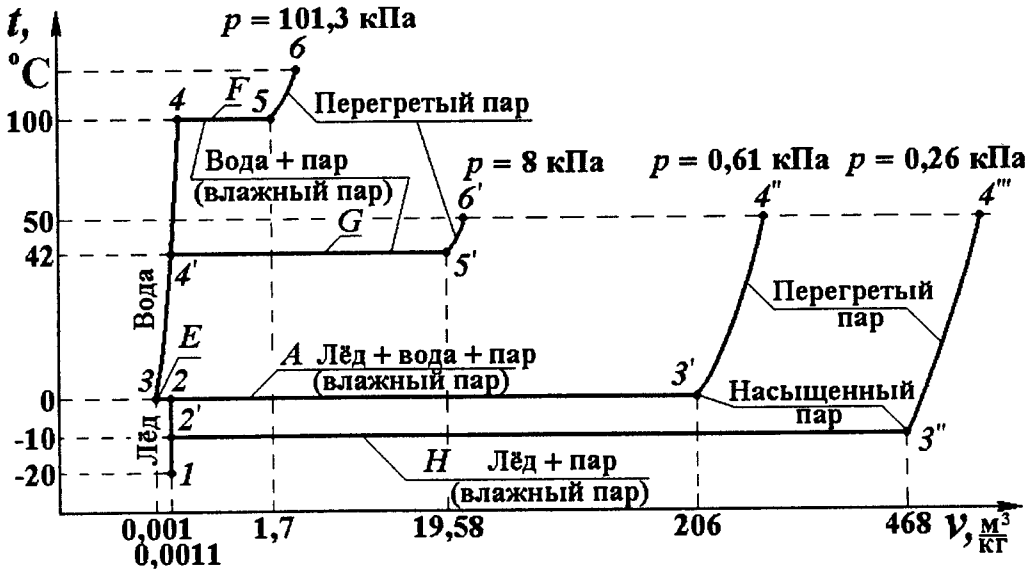


Рис. 3.2. Изменение состояния воды при различных давлениях

При атмосферном давлении p = 101,3 кПа и давлении p = = 8 кПа процессы имеют один и тот же характер: процесс *1–2* – нагревание льда; точка *2* – начало плавления льда; процесс *2–3* – плавление льда; точка *3* – конец плавления. Процессы *3–4* и *3–4′* – нагревание воды; точки *4* и *4′* – начало кипения; процессы *4–5* и *4′–5′* – парообразование; точки *5* и *5′* – состояние сухого насыщенного пара (конец кипения). Процессы *5–6* и *5′–6′* – нагревание пара и переход его в перегретое состояние.

При давлении p = 0,61 кПа, что соответствует ***тройной точке*** (точка *A*), процесс *1–2* является процессом нагревания льда. В точке *2* одновременно начинается процесс таяния льда, парообразования и сублимации, который заканчивается в точке *3′*. Точка *3′* характеризует состояние сухого насыщенного пара, процесс *3′–4″* – нагревание пара и переход его в перегретое состояние.

При давлении p = 0,26 кПа процесс *1–2′* соответствует нагреванию льда. В точке *2′* начинается сублимация, которая заканчивается в точке *3″*, характеризующей состояние сухого насыщенного пара. Процесс *3″–4‴*– перегрев сухого насыщенного пара. В рассматриваемом процессе жидкая фаза отсутствует.

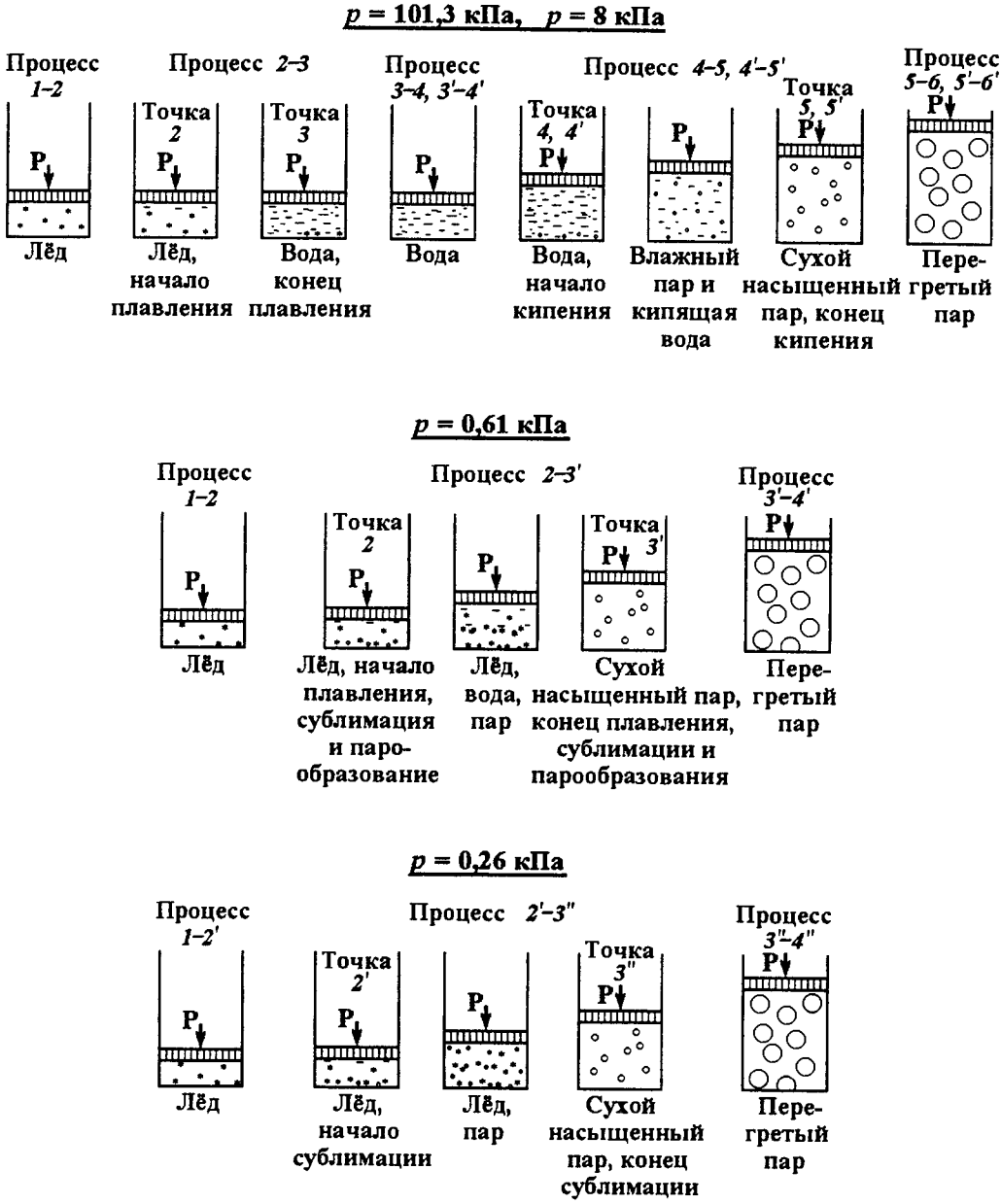


Рис. 3.3. Схематическое изображение процессов изменения состояния воды при различном давлении

Для влажного воздуха, как указывалось ранее, интерес представляет диапазон температур от минус 50 до 50°С, что соответствует давлениям насыщения $p_н$ = 0,0039 кПа и $p_н$ = 12,33 кПа. Эта область охватывает все возможные фазы воды: твёрдую, жидкую и газообразную.

Представленная на рис. 3.1 фазовая *p–t*-диаграмма построена в предположении, что поверхность раздела фаз между водой и паром является плоской.

3.2.2. Влияние кривизны поверхности раздела фаз на давление насыщения

Равновесное давление насыщенного водяного пара зависит не только от температуры, но и от радиуса кривизны поверхности раздела фаз $r_{кр}$. Примером такого раздела фаз может служить капельная влага, находящаяся во взвешенном состоянии в воздухе, например, туман, или капиллярная влага, свободная поверхность которой принимает форму, обусловленную силами поверхностного натяжения и взаимодействия со стенками капилляров. В зависимости от смачиваемости стенок капилляра поверхность мениска может быть вогнутой или выпуклой (рис. 3.4).

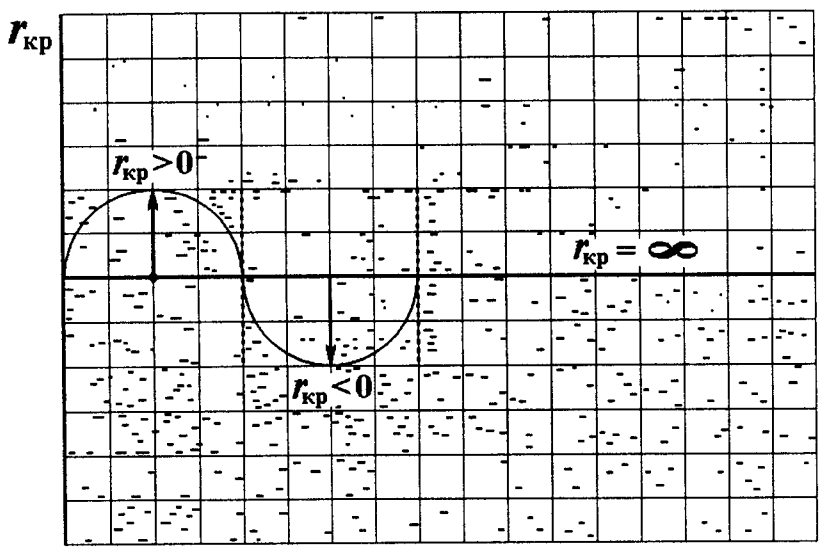


Рис. 3.4. Радиус кривизны поверхности раздела фаз

Зависимость давления насыщения водяного пара от кривизны поверхности определяется уравнением Кельвина

$$\ln\frac{p_{r_{кр}}}{p_{н}} = \frac{2\sigma M}{RT r_{кр}(\rho' - \rho'')},$$

где: $p_{r_{кр}}$ – давление насыщенного водяного пара над поверхностью с радиусом кривизны $r_{кр}$; $p_{н}$ – давление насыщенного водяного пара над плоской поверхностью; σ – коэффициент поверхностного натяжения; R – универсальная газовая постоянная; M – масса 1 кмоля воды; T – температура; ρ' – плотность воды; ρ'' – плотность пара.

Если учесть, что $\rho' >> \rho''$, и подставить числовые значения величин ρ', M и R, то получим следующее выражение:

$$p_{r_{кр}} = p_{н}\exp(4{,}36\cdot 10^{-6}\frac{\sigma}{T r_{кр}}).$$

Для выпуклой поверхности радиус кривизны $r_{кр} > 0$, для вогнутой поверхности $r_{кр} < 0$, а для плоской поверхности $r_{кр} = \infty$.

Значения коэффициента поверхностного натяжения σ в зависимости от температуры приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Коэффициент поверхностного натяжения σ, Н/м, для воды [11]

Температура t, ° С	Коэффициент поверхностного натяжения σ, Н/м
0	0,0755
10	0,0744
20	0,0729
30	0,0712
40	0,0695
50	0,0678

Отношение $p_{r_{кр}}/p_{н}$ принято называть ***пересыщением пара*** и обозначать буквой S, хотя и очевидно, что пересыщенным пар будет только при $S > 1$. При $S = 1$ пар является насыщенным, а при $S < 1$ – ненасыщенным, т. е. перегретым.

В табл. 3.3 приведены значения давления насыщенного водяного пара над поверхностью воды с радиусом кривизны $r_{кр}$, величина пересыщения S и разность давлений $p_{r_{кр}} - p_{н}$ при $T = 293{,}15$ К ($p_{н} = 2{,}23368$ кПа) и $\sigma = 72{,}9$ Н/м.

Таблица 3.3

Давление насыщенного пара над поверхностью с радиусом кривизны $r_{кр}$

Радиус кривизны $r_{кр}$, м	Пересыщение пара S	Давление насыщенного пара $p_{r_{кр}}$, кПа	Разность давлений $p_{r_{кр}} - p_{н}$, кПа
$5 \cdot 10^{-10}$	8,741	19,5246	17,29
$1 \cdot 10^{-9}$	2,9565	6,6039	4,37
$5 \cdot 10^{-9}$	1,2421	2,7745	0,541
$1 \cdot 10^{-8}$	1,1145	2,4894	0,2557
$1 \cdot 10^{-7}$	1,0109	2,2579	0,02422
$1 \cdot 10^{-6}$	1,0011	2,2361	0,00242
$1 \cdot 10^{-5}$	1,00011	2,2339	0,00022
$1 \cdot 10^{-4}$	1,000011	2,2337	0,00002
$1 \cdot 10^{-3}$	1,0000011	2,233682	0,000002
$-1 \cdot 10^{-3}$	0,999999	2,233678	– 0,000002
$-1 \cdot 10^{-4}$	0,99999	2,23366	– 0,00002
$-1 \cdot 10^{-5}$	0,9999	2,23346	– 0,00022
$-1 \cdot 10^{-6}$	0,9989	2,2312	– 0,00248
$-1 \cdot 10^{-7}$	0,9892	2,2096	– 0,0241
$-1 \cdot 10^{-8}$	0,8997	2,0096	– 0,2241
$-5 \cdot 10^{-9}$	0,8051	1,7983	– 0,4354
$-1 \cdot 10^{-9}$	0,3382	0,7554	– 1,4783
$-5 \cdot 10^{-10}$	0,1144	0,2555	– 1,9782

Данные, приведённые в табл. 3.3, особенно для капель очень малого радиуса, следует рассматривать как ориентировочные, так как с уменьшением радиуса капли коэффициент поверхностного натяжения σ также уменьшается, но достоверных данных [13] о зависимости $\sigma = f(r_{кр})$ в литературе нет.

Из приведённых в табл. 3.3 данных видно, что пересыщение пара над выпуклой и недосыщение пара над вогнутой поверхностями становится особенно заметным при $r_{кр} < \pm 10^{-7}$м. Однако следует отметить, что и весьма незначительное изменение значения S существенно влияет на процессы конденсации и испарения.

3.2.3. Фазовая s–t-диаграмма

Как указывалось ранее, вода обладает аномальными свойствами, поэтому расположение её изобар отличается от расположения изобар нормальных жидкостей.

Этот вопрос достаточно подробно рассмотрен в [14] для области воды и плавления льда для интервала температур от минус 30 до 100°С.

На рис. 3.5 приведена указанная диаграмма, в которой справа от пограничной кривой *ab* находится область двухфазного состояния вода – пар, а слева – область воды высокого давления. Ниже температуры первой тройной точки $t = 0{,}01$°С и давления $p = 0{,}61$ кПа (линия *caf*) располагается область сублимации, которая соответствует только области давлений ниже 0,61 кПа. При более высоких давлениях при затвердевании воды образуется аномальный лёд I, у которого с ростом давления температура плавления снижается. Область плавления аномального льда, показанная сплошной линией *aedha*, находится в нижней левой четверти диаграммы между температурой $t = 0{,}01$°С и температурой второй тройной точки $t = -22$°С при давлении $p = 214$ МПа.

Вся область плавления льда I в *s–t*-координатах налагается на область сублимации. Эти области налагаются друг на друга только как проекции термодинамической поверхности состояний вещества на плоскость *s–t* и из одной области можно перейти в другую лишь через линию действительного их соприкосновения при температуре первой тройной точки 0,01°С.

Необычное расположение изобар воды получается вследствие её аномалии, т. е. наличия на изобарах воды состояния максимальной плотности, которая при нормальном давлении имеет место при $t = 4$°С (точка *b* на кривой *ab*). Известно, что температура максимальной плотности воды медленно снижается с повышением давления: на каждые 9,21 МПа температура падает на 2°С. Температура плавления льда I также снижается с повышением давления. При давлении воды 28,4 МПа температура максимальной плотности воды совпадает с температурой плавления льда I и равна $t = -2{,}2$°С.

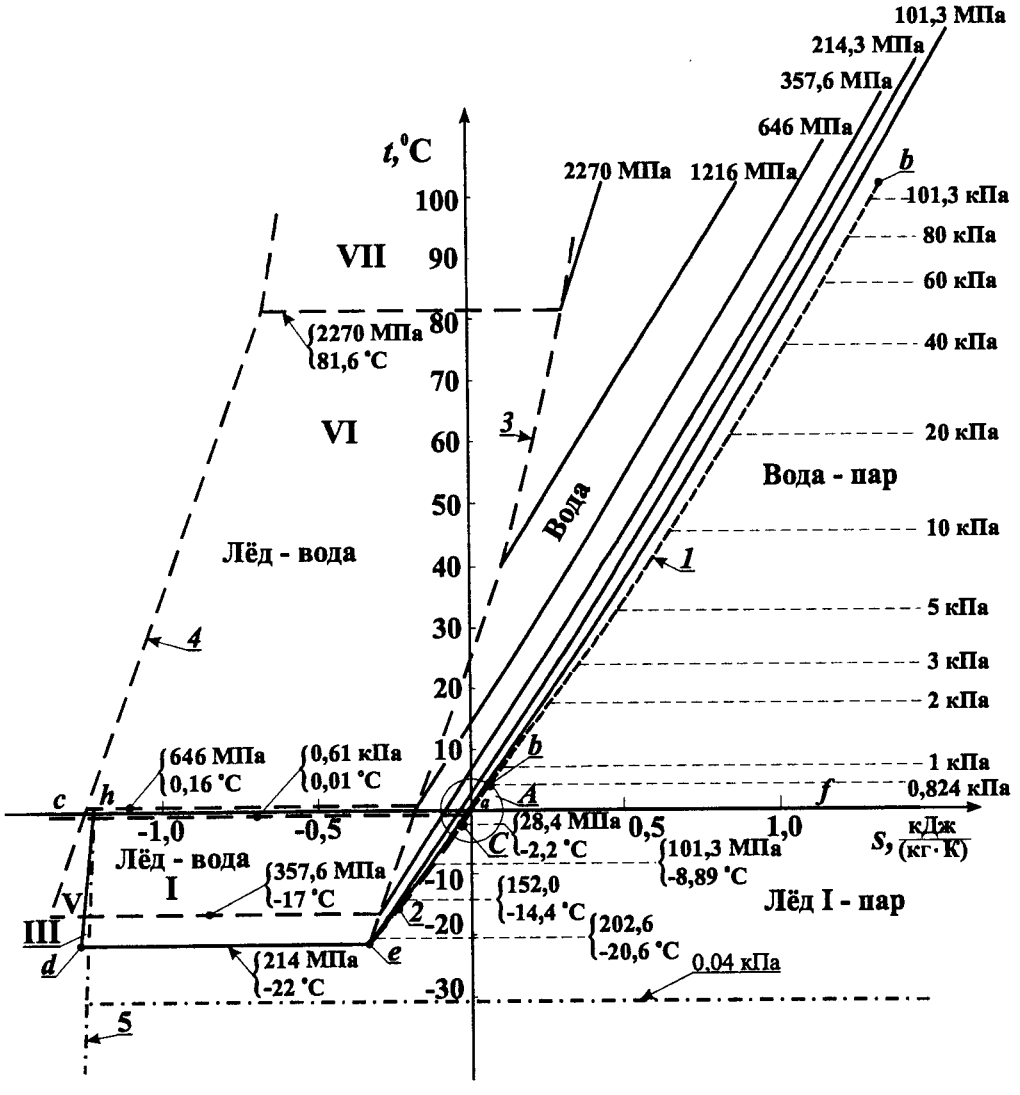


Рис. 3.5. Фазовая *s–t*-диаграмма для воды

Следовательно, состояние максимальной плотности воды для изобары 28,4 МПа будет находиться на правой пограничной кривой плавления льда I (точка *C* на кривой *ae*). Для более высоких давлений температуры максимальной плотности воды нет, так как вода замерзает раньше, чем достигается эта температура. Для промежуточных изобар воды, лежащих между давлением 0,824 кПа и 28,4 МПа, температура максимальной плотности воды будет находиться между 4 и минус 2,2°С.

Изобары воды от первой тройной точки при давлении 0,61 – 0,824 кПа, соответствующие температурам парообразования от 0,01° до 4°С, не имеют точки максимальной плотности. На основании этого изобары воды при давлениях до 0,824 кПа идут от неё, пересекая область двухфазного состояния вода-пар, до встречи с правой пограничной кривой плавления льда между температурами 0 и 0,01°С. Вследствие малости занимаемого участка изобары на рис. 3.5 не нанесены.

Изобары воды при давлении выше 0,824 кПа пересекаются с левой пограничной кривой парообразования ниже температуры 4°С. Эти изобары воды отходят от пограничной кривой парообразования с понижением температуры, достигают состояния максимальной плотности и подходят к правой пограничной кривой плавления льда.

Для давлений выше 28,4 МПа на изобарах воды уже не будет состояний максимальной плотности, поэтому они идут круче пограничной кривой плавления льда I, подходя к ней слева. Рассмотренная выше область схематически в увеличенном виде представлена на рис. 3.6.

Кроме льда I существует ряд других модификаций льда, образующихся при замерзании воды при сверхвысоких давлениях, области плавления которых приведены на рис. 3.5.

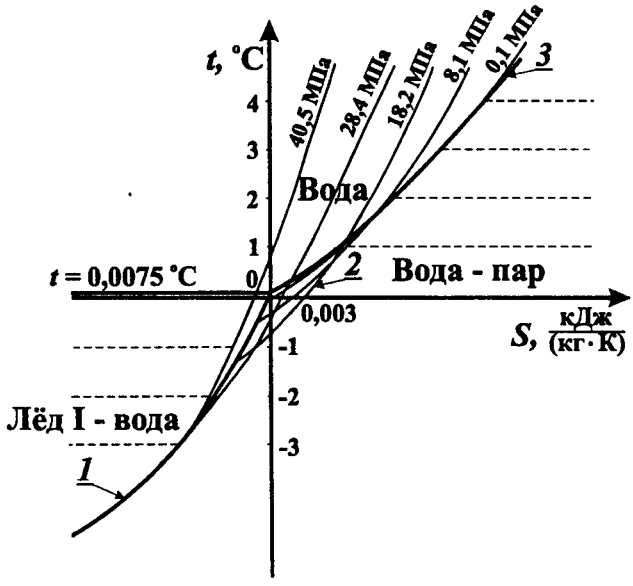


Рис. 3.6. Аномальная область воды:
1 – правая пограничная кривая плавления льда I; *2* – аномальная область воды; *3* – левая пограничная кривая парообразования

3.3. Твёрдая фаза – лёд

Твёрдая фаза воды (лёд) практически несжимаема. При атмосферном и близких к нему давлениях плотность льда можно принимать постоянной и равной $\rho_л = 916{,}8$ кг/м^3, а удельный объём $v_л = 0{,}00109$ м^3/кг.

Средние значения удельной теплоёмкости льда в интервале температур от минус 50° до 0°С приведены в табл. 3.4 [1].

Таблица 3.4

Удельная массовая теплоёмкость льда

Температура t, °С	Удельная массовая теплоёмкость льда $\bar{c}_л$, кДж/(кг·К)
–50	1,924
–40	1,961
–30	1,997
–20	2,034
–10	2,071
0	2,108

Для расчётов, не требующих высокой точности, среднее значение удельной массовой теплоёмкости льда для диапазона температур от минус 50 до 0°С $\bar{c}_л = 1{,}924$ кДж/(кг·К).

Согласно фазовой s–t-диаграмме для воды, температура плавления льда зависит от давления. С увеличением давления эта температура падает. График зависимости $t_{пл} = f(p)$ приведён на рис. 3.7 для аномального льда I.

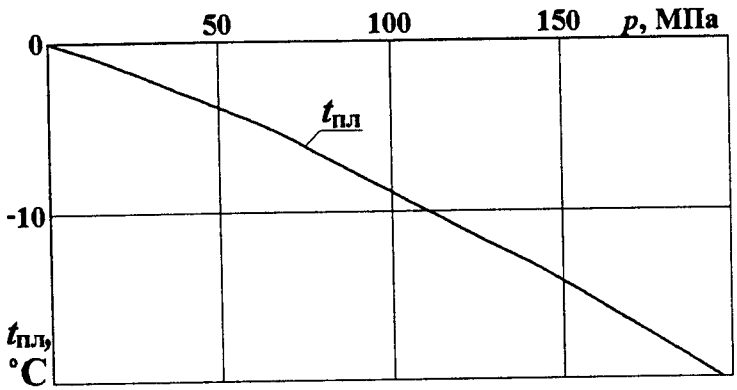


Рис. 3.7. Зависимость температуры плавления льда $t_{пл}$ от давления

Удельные значения теплоты плавления льда в зависимости от температуры по данным [15] приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Удельная теплота плавления льда

Температура t, °С	Удельная теплота плавления льда $r_{пл}$, кДж/кг
–50	221,06
–40	243,67
–30	266,28
–20	288,89
–10	311,92
0	334,11

Для температур от минус 50 до минус 30°С значения $r_{пл}$ рассчитаны по аппроксимационной формуле

$$r_{пл} = 334{,}11 + 2{,}261 t_н = r_{пл_0} + 2{,}261 t_н, \qquad (3.13)$$

где $r_{пл_0} = 334{,}11$ кДж/кг – теплота плавления льда при $t = 0$°С.

При давлении насыщения $p_н < 0{,}61$ кПа лёд сублимирует.

Удельные значения теплоты сублимации льда для соответствующих значений температур насыщения $t_н$ и давлений $p_н$ приведены в табл. 3.6 [15].

Таблица 3.6

Удельная теплота сублимации льда

Температура насыщения $t_н$, °С	Давление насыщения $p_н$, кПа	Удельная теплота сублимации льда $r_{суб}$, кДж/кг
– 40	0,0128	2840,91
– 30	0,038	2839,37
– 20	0,10	2838,65
– 10	0,26	2836,52
0	0,61	2834,75

Для температур насыщения минус 30 и минус 40 °С значения $r_{суб}$ рассчитаны по аппроксимационной формуле

$$r_{суб} = 2834{,}75 - 0{,}1541 t_н = r_{суб_0} - 0{,}1541 t_н, \qquad (3.14)$$

где $r_{суб_0} = 2834{,}75$ кДж/кг – теплота сублимации льда при $t = 0$°С.

При принятом в термодинамике условии, что энтальпия воды при $t = 0$°С равна нулю, удельная энтальпия льда при температуре t будет определяться по формуле

$$h_л = \bar{c}_л t - r_{пл_0}. \qquad (3.15)$$

Значения удельной энтальпии льда для диапазона температур от минус 50 до 0°С приведены в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Удельная энтальпия сублимирующего льда

Температура t, °С	Удельная энтальпия сублимирующего льда $h_л$, кДж/кг	Погрешность, %	Примечание
– 50	– 430,31 – 430,31	0	$\bar{c}_л = f(t)$ $\bar{c}_л = 1{,}924$ кДж/(кг·К)
– 40	– 412,55 – 411,07	0,36	$\bar{c}_л = f(t)$ $\bar{c}_л = 1{,}924$ кДж/(кг·К)
– 30	– 394,02 – 391,83	0,55	$\bar{c}_л = f(t)$ $\bar{c}_л = 1{,}924$ кДж/(кг·К)
– 20	– 374,79 – 372,59	0,59	$\bar{c}_л = f(t)$ $\bar{c}_л = 1{,}924$ кДж/(кг·К)
– 10	– 354,82 – 353,35	0,41	$\bar{c}_л = f(t)$ $\bar{c}_л = 1{,}924$ кДж/(кг·К)
0	– 334,11 – 334,11	0	$\bar{c}_л = f(t)$ $\bar{c}_л = 1{,}924$ кДж/(кг·К)

Удельная энтропия льда рассчитывается по формуле

$$s_л = \bar{c}_{p_л} \ln \frac{T_н}{273{,}15} - \frac{r_{пл_0}}{273{,}15}. \qquad (3.16)$$

Для диапазона температур от минус 50 до 0°С значения удельной энтропии льда приведены в табл. 3.8.

Таблица 3.8

Удельная энтропия льда

Температура t, °С	Удельная энтропия сублимирующего льда $s_л$, кДж/кг	Погрешность, %	Примечание
– 50	– 1,612 – 1,612	0	$\bar{c}_л = f(t)$ $\bar{c}_л = 1{,}924$ кДж/(кг·К)
– 40	– 1,533 – 1,528	0,33	$\bar{c}_л = f(t)$ $\bar{c}_л = 1{,}924$ кДж/(кг·К)
– 30	– 1,455 – 1,447	0,55	$\bar{c}_л = f(t)$ $\bar{c}_л = 1{,}924$ кДж/(кг·К)
– 20	– 1,378 – 1,369	0,65	$\bar{c}_л = f(t)$ $\bar{c}_л = 1{,}924$ кДж/(кг·К)
– 10	– 1,300 – 1,295	0,38	$\bar{c}_л = f(t)$ $\bar{c}_л = 1{,}924$ кДж/(кг·К)
0	– 1,223 – 1,223	0	$\bar{c}_л = f(t)$ $\bar{c}_л = 1{,}924$ кДж/(кг·К)

3.4. Жидкая фаза – вода

Вода, как и все капельные жидкости, практически несжимаема. Коэффициент объёмного расширения $\beta = 5{,}7 \cdot 10^{-4}\ К^{-1}$ (при t = = 70°С) характеризует изменение объёма воды при нагревании, а изотермический коэффициент сжатия $\beta_т \approx 4 \cdot 10^{-7}\ кПа^{-1}$ – изменение объёма воды под действием сжатия.

Поэтому для воды, не находящейся в состоянии насыщения, принимают удельный объём v равный удельному объёму в состоянии насыщения v', т. е. $v \approx v'$.

В табл. 3.9 приведены значения v' при различной температуре или давлении насыщения.

Таблица 3.9

Удельный объём воды в состоянии насыщения

Температура t, °С	Давление насыщения $p_н$, кПа	Удельный объём v', м^3/кг
0	0,610	0,0010002
5	0,872	0,0010001
10	1,227	0,0010004
15	1,704	0,0010010
20	2,337	0,0010018
25	3,167	0,0010030
30	4,243	0,0010044
35	5,624	0,0010060
40	7,378	0,0010079
45	9,59	0,0010099
50	12,34	0,0010121
100	101,325	0,0010435

Как видно из таблицы, изменение удельного объёма v' в диапазоне температур от 0 до 50°С составляет чуть более 1%. Поэтому для практических расчётов можно считать удельный объём воды постоянным и равным среднему значению

$$v \approx v'_{ср} = \frac{v'_{0°C} + v'_{50°C}}{2} = 0{,}001006\ м^3/кг.$$

Погрешность при этом не превышает 0,6%.

Плотность воды $\rho_в = 994{,}04\ кг/м^3$.

Средние значения удельной массовой теплоёмкости воды в интервале температур от 0 до 60°С представлены в табл. 3.10 [1].

Таблица 3.10

Массовая удельная теплоёмкость воды

Температура t, °С	Массовая удельная теплоёмкость воды $\bar{c}_{p_в}$, кДж/(кг·К)
0	4,218
20	4,195
40	4,187
60	4,185

Для расчётов, не требующих высокой точности, среднюю удельную массовую теплоёмкость воды для диапазона температур от 0 до 50°С следует принимать

$$\bar{c}_{p_в} = 4{,}186 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Удельная теплота парообразования r является функцией температуры (или давления) насыщения $r = f(t_н)$ и для диапазона температур от 0 до 50°С хорошо аппроксимируется линейной зависимостью

$$r = r_0 - 2{,}369 t_н = 2500{,}64 - 2{,}369 t_н. \qquad (3.17)$$

В табл. 3.11 приведены значения удельной теплоты парообразования и дана погрешность, которая не превышает в указанном диапазоне температур ±0,05%.

Таблица 3.11

Удельная теплота парообразования

Температура t, °С	Удельная теплота парообразования r, кДж/кг		Погрешность, %
	по данным [1,15]	по формуле (3.17)	
0	2500,64	2501,72	– 0,043
10	2477,20	2477,7	– 0,02
20	2453,68	2453,68	0
30	2430,02	2429,66	0,015
40	2406,21	2405,64	0,024
50	2382,18	2381,62	0,023

Количество теплоты, расходуемое на нагревание воды от температуры 0°С до температуры кипения при соответствующем давлении, определяют по уравнению

$$q = h' - h_0,$$

где h' – энтальпия кипящей жидкости; h_0 – энтальпия воды при t = = 0°С.

В термодинамике энтальпию и энтропию воды в тройной точке принимают равной нулю: $h_0 = 0, \quad s_0 = 0.$

Внутренняя энергия воды в тройной точке очень мала и равна $u_0 = -0{,}611$ Дж/кг.

Тогда энтальпию кипящей воды можно определить по формуле

$$h' = \bar{c}_{p_в} t_н. \tag{3.18}$$

В табл. 3.12 приведены значения энтальпии кипящей воды в зависимости от температуры, вычисленные по формуле (3.18), и значения, взятые из термодинамических таблиц [10], а также дана величина погрешности.

Таблица 3.12

Удельная энтальпия кипящей воды

Температура t, °С	Удельная энтальпия h', кДж/кг		Погрешность, %
	по формуле (3.18)	по таблицам [10]	
0	0	0	—
5	20,95	21,06	0,43
10	41,90	42,04	0,33
15	62,85	62,97	0,14
20	83,80	83,90	0,12
25	104,75	104,80	0,05
30	125,70	125,69	0,01
35	146,65	146,58	0,05
40	167,60	167,51	0,06
45	188,55	188,41	0,07
50	209,50	209,30	0,10
100	419,00	419,10	0,024

Таким образом, при постоянном значении теплоёмкости воды ошибка в вычислении энтальпии h' не превышает 0,5%.

Удельная энтропия воды может быть рассчитана по формуле

$$s' = \bar{c}_{p_в} \ln \frac{T_н}{273{,}15}. \tag{3.19}$$

С учётом, что $\bar{c}_{p_в} = \text{const}$, значения удельной энтропии, вычисленные по формуле (3.19), даны в табл. 3.13. Там же приведены опытные значения и погрешность, выраженная их процентным соотношением.

Таблица 3.13

Удельное значение энтропии воды

Температура t, °С	Удельная энтропия s', кДж/кг		Погрешность, %
	по формуле (3.19)	по таблицам [10]	
0	0	0	—
5	0,0760	0,0762	0,26
10	0,1506	0,1511	0,33
15	0,2240	0,2244	0,18
20	0,2961	0,2964	0,10
25	0,3669	0,3672	0,08
30	0,4366	0,4367	0,02
35	0,5052	0,5049	0,06
40	0,5726	0,5723	0,05
45	0,6390	0,6385	0,08
50	0,7043	0,7038	0,07
100	1,3071	1,3071	0

Как указывалось ранее, вода обладает аномальными свойствами. При нормальном давлении максимальная плотность воды наблюдается при температуре $t = 4$°С.

Зависимость температуры максимальной плотности воды от давления определяется формулой [14]

$$t_{\rho} = 4 - 0{,}000217\,p, \qquad (3.20)$$

из которой видно, что с повышением давления температура максимальной плотности воды падает.

Температура замерзания воды также зависит от давления и может быть определена из уравнения [14]

$$t_{\text{пл}} = (0{,}075 + 1{,}382 \cdot 10^{-8}\,p)(1 - 0{,}0009869\,p). \qquad (3.21)$$

Решая совместно уравнения (3.20) и (3.21) найдём, что температура максимальной плотности воды совпадает с температурой замерзания при $t = -2{,}2$°С и $p = 28$ МПа, и, следовательно, состояния максимальной плотности воды для более высоких давлений уже не существует, так как вода замерзает раньше, чем будет достигнута эта температура. На рис. 3.8 представлена зависимость t_{ρ} и $t_{\text{пл}}$ от давления p. Точка A характеризует указанное выше состояние.

Как следует из уравнения (3.21) и кривой $t_{\text{пл}} = f(p)$ на рис. 3.8, при повышении давления температура замерзания воды падает. Это необходимо учитывать при определении температуры замерзания капельной влаги, например, находящихся во взвешенном состоянии в воздухе капель воды.

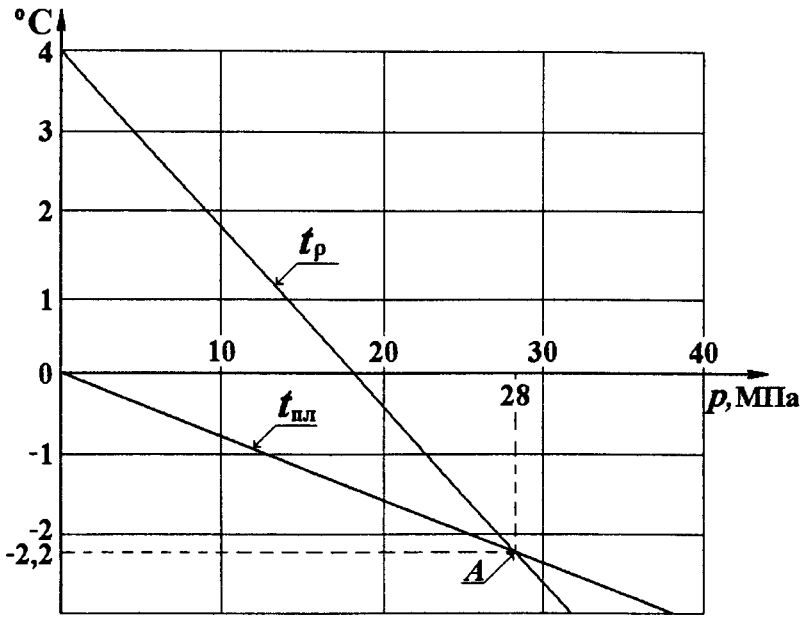


Рис. 3.8. Зависимость $t_р$ и $t_{пл}$ от давления p

Условие механического равновесия сил для капли воды сферической формы определяется уравнением Лапласа

$$p_к = p + \frac{2\sigma}{r_к},$$

где $p_к$ – давление внутри капли; p – атмосферное давление; σ – коэффициент поверхностного натяжения; $r_к$ – радиус капли.

В табл. 3.14 приведены значения давления и температуры замерзания капель с радиусом $r_к$.

Таблица 3.14

Давление внутри капли с радиусом $r_к$ и температура её замерзания ($\sigma = 75{,}5 \cdot 10^{-3}$ Н/м)

Радиус капли $r_к$, м	Давление воды внутри капли $p_к$, кПа	Температура замерзания $t_{пл}$, °С
10^{-3}	101,476	0,0675
10^{-4}	102,835	0,0673
10^{-5}	116,42	0,066
10^{-6}	252,325	0,056
10^{-7}	1611,325	– 0,04
10^{-8}	15201,3	– 1,05
$7 \cdot 10^{-9}$	21671,0	– 1,61
$5 \cdot 10^{-9}$	30301,0	– 2,18
$2 \cdot 10^{-9}$	75601,0	– 5,60
10^{-9}	151101,0	– 11,42

Как видно из приведённых данных, при $r_к \geq 10^{-7}$ м температура замерзания практически не отличается от 0°С. При $r_к < 10^{-7}$м температура замерзания начинает заметно уменьшаться, а при $r_к < 5 \cdot 10^{-9}$м наблюдается резкое снижение температуры замерзания капель.

Физические и термодинамические свойства воды приведены в приложении (табл. 2, 3, 4, 5).

3.5. Газообразная фаза – водяной пар

Газообразная фаза воды в зависимости от температуры включает в себя сухой насыщенный, перегретый и влажный пар.

3.5.1. Сухой насыщенный пар

Как указывалось ранее, состояние сухого насыщенного пара определяется одним параметром – давлением насыщения $p_н$ или температурой насыщения $t_н$. Эта зависимость приведена на рис. 3.1 (кривая *CAD*).

Для сухого насыщенного пара $x_л = 0$ и $x' = 0$ и его состояние в t–v-диаграмме (см. рис. 3.2) характеризуется точками *5*, *5'*, *3'* и *3''*.

Для пара мольная масса и газовая постоянная

$$\mu'' = 18{,}016 \text{ кг/кмоль}, \quad R_п = 461{,}5 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Сухой насыщенный пар при обычных значениях давления и температуры незначительно отклоняется от поведения идеального газа. Значение фактора сжимаемости Z для водяного пара дано в табл. 3.15.

Таблица 3.15

Фактор сжимаемости водяного пара

Температура t, °С	Фактор сжимаемости Z
0	0,9995
20	0,9991
40	0,9976
60	0,9946
80	0,9905

Это позволяет применять уравнение Клапейрона для идеального газа.

В табл. 3.16 приведены вычисленные и опытные табличные значения v'' и ρ'' для насыщенного водяного пара.

Таблица 3.16

Удельный объём и плотность насыщенного водяного пара

Температура t, °С	Давление насыщения $P_н$, Па	Удельный объём v'', м³/кг		Плотность ρ'', кг/м³		Погрешность, %
		по формуле (1.4)	по таблице [11]	по формуле (1.4)	по таблице [11]	
–50	3,9	26447	–	0,0000378	–	–
–40	12,8	8406	–	0,000119	–	–
–30	37,9	2961	–	0,000338	–	–
–20	103,2	1132,1	–	0,00088	–	–
–10	259,5	468	–	0,002137	–	–
0	610,0	206,65	206,19	0,00484	0,00483	0,22
10	1227	106,5	106,38	0,00939	0,00940	0,11
20	2337	57,09	57,80	0,0162	0,0173	0,16
30	4143	32,97	32,89	0,0303	0,0304	0,24
40	7378	19,58	19,53	0,0511	0,0512	0,26
50	12340	12,08	12,05	0,0828	0,0830	0,25
100	101325	1,699	1,675	0,588	0,597	1,43

Удельная теплоёмкость насыщенного водяного пара, по данным [16], в зависимости от температуры приведена в табл. 3.17.

Таблица 3.17

Удельная теплоёмкость насыщенного водяного пара

Температура t, °С	Удельная теплоёмкость $c_{p_п}$, кДж/(кг·К)	Усреднённая удельная теплоёмкость $\bar{c}_{p_п}$, кДж/(кг·К)	Погрешность, %
0	1,86	1,87	0,54
10	1,86	1,87	0,54
20	1,86	1,87	0,54
30	1,87	1,87	0
40	1,88	1,87	0,53
50	1,91	1,87	1,5

Удельная теплоёмкость пара при $t = -50$°С [1] $\bar{c}_{p_п} =$ $= 1{,}855$ кДж/(кг·К), поэтому можно считать для диапазона температур от минус 50 до 50°С удельную теплоёмкость насыщенного водяного пара постоянной и равной $\bar{c}_{p_п} = 1{,}86$ кДж/(кг·К).

Удельная энтальпия сухого насыщенного водяного пара h'' при $t_н > 0°C$ с учётом (3.18)

$$h'' = h' + r = \bar{c}_{p_в} t_н + r. \qquad (3.22)$$

При $t_н < 0°C$ удельная энтальпия сухого насыщенного пара определяется по формуле

$$h'' = \bar{c}_{p_л} - r_{пл_0} + r_{суб}. \qquad (3.23)$$

Значения удельной энтальпии сухого насыщенного пара приведены в табл. 3.18.

Таблица 3.18

Удельная энтальпия сухого насыщенного пара

Температура, °С	Удельная энтальпия h'', кДж/кг
Надо льдом	
– 50	2412,1
– 40	2429,8
– 30	2447,5
– 20	2465,2
– 10	2482,9
0	2500,64
Над водой	
10	2519,1
20	2537,48
30	2555,7
40	2573,8
50	2591,68

Удельная энтропия сухого насыщенного водяного пара

– при $t_н > 0°C$

$$s'' = s' + \frac{r}{T_н} = \bar{c}_{p_в} \ln\frac{T_н}{273{,}15} + \frac{r}{T_н}, \qquad (3.24)$$

– при $t_н < 0°C$

$$s'' = \bar{c}_{p_л} \ln\frac{T_н}{273{,}15} - \frac{r_{пл_0}}{273{,}15} + \frac{r_{суб}}{T_н}. \qquad (3.25)$$

В табл. 3.19 даны значения удельной энтропии сухого насыщенного пара для диапазона температур от минус 50 до 50°С.

Таблица 3.19

Удельная энтропия сухого насыщенного пара

Температура, °С	Удельная энтропия s'', кДж/(кг·К)
Надо льдом	
– 50	10,9027
– 40	10,2912
– 30	10,098
– 20	9,7538
– 10	9,4377
0	9,1548
Над водой	
10	8,899
20	8,666
30	8,4525
40	8,2565
50	8,076

Физические и термодинамические свойства насыщенного водяного пара даны в приложении (табл. 2, 3, 4 и 6).

3.5.2. Перегретый пар

Перегретым паром называется пар, имеющий при данном давлении более высокую температуру, чем сухой насыщенный пар. ***Теплота перегрева*** – это количество теплоты, которое необходимо затратить на перегрев 1кг сухого насыщенного пара до требуемой температуры при постоянном давлении.

Удельный объём и плотность перегретого водяного пара при нормальном давлении p = 101,325 кПа, рассчитанные по уравнению для идеального газа, даны в табл. 3.20.

Таблица 3.20

Удельный объём и плотность перегретого пара

Температура t, °С	Удельный объём $v_п$, м^3/кг	Плотность $\rho_п$, кг/м^3
–50	1,0164	0,984
–30	1,1075	0,903
–10	1,1986	0,834
0	1,2442	0,804
10	1,3353	0,749
30	1,4264	0,701
50	1,4719	0,679

Количество теплоты, расходуемой на перегрев пара, может быть определено из следующего уравнения:

$$q_{\text{п}} = \bar{c}_{p_{\text{п}}}(t_{\text{п}} - t_{\text{н}}),$$

где $\bar{c}_{p_{\text{п}}}$ – среднее значение удельной теплоёмкости перегретого пара в интервале температур от $t_{\text{н}}$ до $t_{\text{п}}$.

Удельную теплоёмкость перегретого пара для диапазона температур до 50°С можно считать постоянной и равной $\bar{c}_{\text{п}} = 1{,}86$ кДж/(кг·К).

Удельное значение энтальпии перегретого пара определяется по уравнению

$$h_{\text{п}} = h'' + \bar{c}_{p_{\text{п}}}(t_{\text{п}} - t_{\text{н}}). \qquad (3.26)$$

Удельная энтропия перегретого пара

$$s_{\text{п}} = s'' + \bar{c}_{p_{\text{п}}} \ln\frac{T_{\text{п}}}{T_{\text{н}}}. \qquad (3.27)$$

С учётом выражений для перегретого водяного пара (3.22) и (3.24) формулы (3.26) и (3.27) могут быть записаны в следующем виде:

$$h_{\text{п}} = \bar{c}_{p_{\text{в}}} t_{\text{н}} + r + \bar{c}_{p_{\text{п}}}(t_{\text{п}} - t_{\text{н}}); \qquad (3.28)$$

$$s_{\text{п}} = \bar{c}_{p_{\text{в}}} \ln\frac{T_{\text{н}}}{273{,}15} + \frac{r}{T_{\text{н}}} + \bar{c}_{p_{\text{п}}} \ln\frac{T_{\text{п}}}{T_{\text{н}}}. \qquad (3.29)$$

При $t_{\text{н}} < 0$°С удельная энтальпия и энтропия перегретого водяного пара определяются из выражений

$$h_{\text{п}} = \bar{c}_{p_{\text{л}}} t_{\text{н}} - r_{\text{пл}_0} + r_{\text{суб}} + \bar{c}_{p_{\text{п}}}(t_{\text{п}} - t_{\text{н}}); \qquad (3.30)$$

$$s_{\text{п}} = \bar{c}_{p_{\text{л}}} \ln\frac{T_{\text{н}}}{273{,}15} - \frac{r_{\text{пл}_0}}{273{,}15} + \frac{r_{\text{суб}}}{T_{\text{н}}} + \bar{c}_{p_{\text{п}}} \ln\frac{T_{\text{п}}}{T_{\text{н}}}. \qquad (3.31)$$

Термодинамические свойства перегретого водяного пара даны в приложении (табл. 5).

3.5.3. Влажный пар

Влажный пар является гетерогенной системой, которая может быть двух- или трёхфазной.

При температуре $t_н > 0°C$ и давлении $p_н > 0{,}61$ кПа (для плоской поверхности раздела фаз) влажный пар является двухфазной системой, состоящей из водяного пара и воды (процессы *4-5* и *4′-5′* на рис. 3.2).

При температуре $t_н = 0°C$ и давлении $p_н = 0{,}61$ кПа влажный пар является трёхфазной системой, состоящей из водяного пара, воды и льда (процесс 2-3′), а при $t_н < 0°C$ и $p_н < 0{,}61$ кПа влажный пар состоит из водяного пара и льда.

Если обозначить массовую долю сухого насыщенного пара через x'', воды x' и льда $x_л$, то для трёхфазной системы влажного пара справедливо равенство: $x'' + x' + x_л = 1$.

Величину x'' называют ***степенью сухости пара***.

Для двухфазной системы при $t_н > 0°C$ $x_л = 0$ и массовая доля кипящей воды

$$x' = 1 - x''.$$

Для двухфазной системы при $t_н < 0°C$ $x' = 0$ и массовая доля сублимирующего льда

$$x_л = 1 - x''.$$

Удельный объём влажного пара v_x определяется как объём смеси, состоящей из сухого насыщенного пара, воды и льда

$$v_x = x''v'' + x'v' + x_л v_л,$$

где v'' – удельный объём сухого насыщенного пара.

Для двухфазных систем соответственно будем иметь

$$v_x = x''v'' + x'v' = v''x'' + v'(1 - x'') \text{ и } v_x = x''v'' + x_л v_л = v''x'' + v_л(1 - x'').$$

Удельные значения энтальпии и энтропии влажного пара определяются:

– для трёхфазной системы при $t = 0°C$ и $p = 0{,}61$ кПа

$$h_x = h_л x_л + h'x' + h''x'' \quad \text{и} \quad s_x = s_л x_л + s'x' + s''x'';$$

– для двухфазной системы при $t > 0°C$ и $p > 0{,}61$ кПа

$$h_x = h'x' + h''x'' \quad \text{и} \quad s_x = s'x' + s''x'';$$

– для двухфазной системы при $t < 0°C$ и $p < 0{,}61$ кПа

$$h_x = h_л x_л + h''x'' \quad \text{и} \quad s_x = s_л x_л + s''x''.$$

****

4. Влажный воздух

4.1. Состав влажного воздуха

В природе не существует чистого сухого воздуха: в нем всегда содержится водяной пар. Обычно смесь сухого воздуха и водяного пара называют ***влажным воздухом***. Такое определение, часто встречаемое в монографиях и учебниках, не является общим, так как в состав влажного воздуха может входить не только водяной пар, но и находящиеся во взвешенном состоянии капли воды и кристаллы льда (туман).

Поэтому в дальнейшем под понятием ***влажный воздух*** будем понимать гетерогенную смесь, состоящую из сухого воздуха, водяного пара и находящихся во взвешенном состоянии капель воды и кристаллов льда.

Если во влажном воздухе отсутствуют капли воды и кристаллы льда, то в этом случае влажный воздух является гомогенной парогазовой смесью, в состав которой входят сухой воздух и водяной пар.

Объёмная доля водяного пара в воздухе может изменяться в достаточно широких пределах – от 4% по объему в тропиках до 1% в средних широтах и 0,01% в холодных зонах в зимнее время, т.е. в 400 раз. Относительно небольшое количество водяного пара в общей смеси воздуха придает влажному воздуху особые свойства.

В дальнейшем влажный воздух мы будем рассматривать как смесь, состоящую из двух компонентов – сухого воздуха и воды (в парообразном, жидком, твердом состояниях).

Влажный воздух может быть:

– ***ненасыщенным***, когда водяной пар является перегретым (парциальное давление пара $p_п$ ниже давления насыщения $p_н$);

– ***насыщенным***, когда водяной пар является насыщенным (парциальное давление пара $p_п = p_н$);

– ***пересыщенным в метастабильном состоянии***, когда водяной пар является пересыщенным (парциальное давление $p_п > p_н$);

– ***насыщенным (водяной туман)***, когда во влажном воздухе находятся насыщенный водяной пар и капли воды ($p_п = p_н$);

– ***насыщенным (ледяной туман)***, когда во влажном воздухе находятся насыщенный водяной пар и кристаллы льда ($p_п = p_н$, $t < 0{,}01$°C);

– ***насыщенным (смешанный туман)***, когда во влажном воздухе находятся насыщенный водяной пар, капли воды и кристаллы льда ($p_п = p_н$, $t \le 0{,}01$°C).

Влажный воздух по 1, 2 и 3-му состояниям является гомогенной системой и в области нормальных давлений и в интервале температур от минус 50 до 50°С может рассматриваться как смесь идеальных газов, а воздух по 4, 5 и 6-му состояниям – гетерогенная система.

Поскольку в самом общем случае влага, входящая в состав влажного воздуха, может находиться во всех трех агрегатных состояниях (газовом – водяной пар, жидком – вода, твёрдом – лёд), влажный воздух рассматривается с точки зрения термодинамики как гетерогенная двухкомпонентная смесь сухого воздуха и влаги.

Для гомогенной смеси, или для ненасыщенного воздуха, характерно не только то, что в отдельных процессах количество одного компонента (водяного пара) меняется, но и то, что доля этого компонента в смеси не может быть произвольной. Это одно из основных отличий рассматриваемой смеси от обычной смеси идеального газа.

Согласно основным законам термодинамики, для определения состояния двухкомпонентной смеси необходимо знать три независимых термодинамических параметра – давление, температуру и состав смеси. Это значит, что графический анализ процессов, характеризующий изменения состояния двухкомпонентной смеси, можно провести только в трехмерной системе координат.

4.2. Параметры влажного воздуха

Естественной единицей массы влажного воздуха является 1 кг влажного воздуха. В этом случае описание его состава должно производиться с помощью массовой концентрации

$$\xi = \frac{m_{\text{вл}}}{m_{\text{вл}} + m_{\text{с.в}}},$$

где $m_{\text{вл}}$ – масса влаги во влажном воздухе; $m_{\text{с.в}}$ – масса сухого воздуха.

Однако применение массовой концентрации имеет определённые практические недостатки. Обычно масса сухого воздуха при изменениях состояния влажного воздуха остаётся постоянной, тогда как масса влаги, вследствие конденсации или испарения, изменяется.

Поэтому для описания состава влажного воздуха рекомендуется все удельные параметры относить к 1 кг сухого воздуха и использовать

$$d = \frac{m_{\text{вл}}}{m_{\text{с.в}}}, \qquad (4.1)$$

т. е. отношение массы влаги к массе сухого воздуха, называемое ***влагосодержанием***. Единица указанной величины – килограмм влаги на килограмм сухого воздуха.

Таким образом, состояние влажного воздуха определяется тремя параметрами: температурой, общим давлением и влагосодержанием.

Общее давление p влажного воздуха, согласно закону Дальтона, определяется суммой парциальных давлений сухого воздуха $p_{\text{с.в}}$ и водяного пара $p_{\text{п}}$ в газовой фазе

$$p = p_{\text{с.в}} + p_{\text{п}}.$$

Масса влажного воздуха $m_{\text{вл.в}}$ объёмом $V_{\text{вл.в}}$, с учётом (4.1),

$$m_{\text{вл.в}} = m_{\text{с.в}} + m_{\text{вл.в}} = m_{\text{с.в}}(1+d). \qquad (4.2)$$

Плотность влажного воздуха

$$\rho_{\text{вл.в}} = \frac{m_{\text{вл.в}}}{V_{\text{вл.в}}} = \frac{m_{\text{с.в}} + m_{\text{вл}}}{V_{\text{вл.в}}} = \rho_{\text{с.в}} + \rho_{\text{вл}} = \rho_{\text{с.в}}(1+d). \qquad (4.3)$$

Из (4.3) следует

$$d = \frac{\rho_{\text{вл.в}} - \rho_{\text{с.в}}}{\rho_{\text{с.в}}} = \frac{\rho_{\text{вл}}}{\rho_{\text{с.в}}}.$$

Удельный объём $V_{\text{вл.в}}$ принято определять, относя объём влажного воздуха $V_{\text{вл.в}}$ к массе сухого воздуха $m_{\text{с.в}}$,

$$v_{\text{вл.в}} = \frac{V_{\text{вл.в}}}{m_{\text{с.в}}} = \frac{1+d}{\rho_{\text{вл.в}}}.$$

Эта величина отличается от удельного объёма v, отнесённого к общей массе влажного воздуха,

$$v = \frac{V_{\text{вл.в}}}{m_{\text{с.в}} + m_{\text{вл}}} = \frac{v_{\text{вл.в}}}{(1+d)}.$$

Откуда

$$v_{\text{вл.в}} = v(1+d).$$

Если состав влажного воздуха задан массовыми долями
– сухого воздуха

$$g_{\text{с.в}} = \frac{m_{\text{с.в}}}{m_{\text{вл.в}}},$$

– влаги

$$g_{\text{вл}} = \frac{m_{\text{вл}}}{m_{\text{вл.в}}},$$

то с учётом (4.2) будем иметь

$$g_{\text{с.в}} = \frac{1}{1+d}, \quad g_{\text{вл}} = \frac{d}{1+d}.$$

Соотношение между массовыми и объёмными долями, согласно (1.15) и (4.3), имеет вид

$$g_{\text{с.в}} = \frac{\rho_{\text{с.в}}}{\rho_{\text{вл.в}}} r_{\text{с.в}} = \frac{r_{\text{с.в}}}{1+d}, \quad g_{\text{вл}} = \frac{\rho_{\text{вл}}}{\rho_{\text{вл.в}}} r_{\text{вл}} = \frac{r_{\text{вл}} d}{1+d}.$$

В силу аддитивности энтальпии, энтропии и эксергии их удельные значения, отнесённые к 1кг сухого воздуха, определяются по формулам

$$h_{\text{вл.в}} = h_{\text{с.в}} + d h_{\text{вл}}; \tag{4.4}$$

$$s_{\text{вл.в}} = s_{\text{с.в}} + d s_{\text{вл}}; \tag{4.5}$$

$$e_{\text{вл.в}} = e_{\text{с.в}} + d e_{\text{вл}}. \tag{4.6}$$

Формулы (4.1) ÷ (4.6) справедливы для любого состояния влажного воздуха.

Для влажного воздуха используют и ряд других специальных величин, широко применяемых в метрологии, кондиционировании воздуха, холодильной и криогенной технике, процессах сушки: относительную влажность, степень насыщения, абсолютную влажность, температуру точки росы.

Под относительной влажностью воздуха φ понимают отношение парциального давления водяного пара в воздухе $p_{\text{п}}$ к парциальному давлению насыщенного водяного пара $p_{\text{н}}$ при той же температуре, т. е.

$$\varphi = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{н}}}. \tag{4.7}$$

Степень насыщения влажного воздуха ψ – это отношение влагосодержания рассматриваемого воздуха d к влагосодержанию насыщенного воздуха $d_н$ при той же температуре, т. е.

$$\psi = \frac{d}{d_н}. \qquad (4.8)$$

Абсолютная влажность воздуха – масса влаги, содержащейся в 1 м^3 влажного воздуха. По определению эта величина численно равна плотности влаги $\rho_{вл}$.

Под ***температурой точки росы*** $t_р$ обычно подразумевают такую температуру, при которой из изобарно охлаждаемого ненасыщенного воздуха при неизменном влагосодержании начинает выпадать влага, т. е. воздух становится насыщенным. Это определение является неполным, так как не учитывает возможное состояние воздуха в области тумана. Поэтому под ***температурой точки росы*** $t_р$ будем понимать такую температуру влажного воздуха, при которой в изобарном процессе и при постоянном влагосодержании он становится насыщенным.

Пример

Пример 4.1. Влажный воздух массой $m_{вл.в} = 3{,}2$ кг содержит влагу массой $m_{вл} = 0{,}1$ кг. Определить массовую концентрацию ξ, влагосодержание d, массу сухого воздуха $m_{с.в}$, плотность влажного воздуха $\rho_{вл.в}$ и его удельные объёмы $v_{вл.в}$ и v. Плотность сухого воздуха $\rho_{с.в} = 1{,}128$ кг/м^3.

Массовая концентрация

$$\xi = \frac{m_{вл}}{m_{вл.в}} = \frac{0{,}1}{3{,}2} = 0{,}03125 \text{ кг влаги/кг вл.в}.$$

Масса сухого воздуха, согласно (4.2),

$$m_{с.в} = m_{вл.в} - m_{вл} = 3{,}2 - 0{,}1 = 3{,}1 \text{ кг}.$$

Влагосодержание

$$d = \frac{m_{вл}}{m_{с.в}} = \frac{0{,}1}{3{,}1} = 0{,}03226 \text{ кг влаги/кг с.в}.$$

Плотность влажного воздуха

$$\rho_{вл.в} = \rho_{с.в}(1+d) = 1{,}128 \cdot (1 + 0{,}03226) = 1{,}164 \text{ кг/м}^3.$$

Удельные объёмы

$$v_{вл.в} = \frac{1+d}{\rho_{вл.в}} = \frac{1{,}03226}{1{,}164} = 0{,}887 \text{ м}^3/\text{кг с.в};$$

$$v = \frac{v_{вл.в}}{1+d} = \frac{0{,}887}{1{,}03226} = 0{,}859 \text{ м}^3/\text{кг вл.в}.$$

4.3. Гомогенная смесь влажного воздуха

4.3.1. Ненасыщенный влажный воздух

Ненасыщенный влажный воздух представляет собой двухкомпонентную гомогенную парогазовую смесь, состоящую из сухого воздуха и перегретого водяного пара. Для определения тепловлажностного состояния двухкомпонентной смеси необходимо знать три независимых термодинамических параметра. Чаще всего используют такие параметры, как температура, давление и состав смеси, определяемый массовым влагосодержанием. Масса влаги $m_{\text{вл}}$, содержащаяся в ненасыщенном влажном воздухе, будет определяться массой перегретого водяного пара $m_{\text{п}}$. Влагосодержание, в соответствии с (4.1),

$$d = \frac{m_{\text{п}}}{m_{\text{с.в}}}. \tag{4.9}$$

Для перегретого водяного пара парциальное давление $p_{\text{п}}$ всегда меньше парциального давления насыщенного водяного пара $p_{\text{н}}$ при той же температуре. Поскольку перегретый водяной пар подчиняется законам идеальных газов, то

$$p_{\text{п}} = m_{\text{п}} R_{\text{п}} \frac{T}{V_{\text{вл.в}}} \quad \text{и} \quad p_{\text{с.в}} = m_{\text{с.в}} R_{\text{с.в}} \frac{T}{V_{\text{вл.в}}}. \tag{4.10}$$

Следовательно, влагосодержание

$$d = \frac{m_{\text{п}}}{m_{\text{с.в}}} = \frac{R_{\text{с.в}}}{R_{\text{п}}} \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{с.в}}} = \frac{R_{\text{с.в}}}{R_{\text{п}}} \frac{p_{\text{п}}}{p - p_{\text{п}}}. \tag{4.11}$$

Мольная масса для водяного пара $\mu_{\text{п}} = 18{,}016$ кг/кмоль, а газовая постоянная $R_{\text{п}} = \dfrac{8314{,}2}{\mu_{\text{п}}} = 461{,}49$ Дж/(кг · К).

Так как $R_{\text{с.в}} = 287{,}1$ Дж/(кг · К), то формула (4.12) приобретает вид

$$d = 0{,}6221 \frac{p_{\text{п}}}{p - p_{\text{п}}}. \tag{4.12}$$

С учётом (4.7),

$$d = 0{,}6221 \frac{\varphi p_{\text{н}}}{p - \varphi p_{\text{н}}}.$$

Формула (4.12) устанавливает зависимость между парциальным давлением водяного пара в воздухе и его влагосодержанием

$$p_{\text{п}} = p\frac{d}{0{,}6221 + d}. \qquad (4.13)$$

Парциальное давление водяного пара $p_{\text{п}}$ может изменяться от $p_{\text{п}} = 0$ (сухой воздух, $d = 0$) до $p_{\text{п}} = p_{\text{н}}$ (насыщенный водяными парами влажный воздух, $d = d_{\text{н}}$).

Если состав ненасыщенного влажного воздуха задан массовыми долями сухого воздуха $g_{\text{с.в}}$ и перегретого водяного пара $g_{\text{п}}$, то газовая постоянная для 1 кг влажного воздуха

$$R_{\text{вл.в}} = g_{\text{с.в}} R_{\text{с.в}} + g_{\text{п}} R_{\text{п}}$$

или

$$R_{\text{вл.в}} = \frac{R_{\text{с.в}} + dR_{\text{п}}}{1 + d}.$$

Газовая постоянная влажного воздуха, содержащего 1 кг сухого воздуха, соответственно будет определяться из выражения

$$R_{\text{см}} = R_{\text{с.в}} + dR_{\text{п}}.$$

По аналогичной формуле можно определить и мольную массу ненасыщенного влажного воздуха

$$\mu_{\text{см}} = \mu_{\text{с.в}} + d\mu_{\text{п}}.$$

С учётом (4.3) и (4.10) плотность влажного ненасыщенного воздуха

$$\rho_{\text{вл.в}} = \frac{p}{R_{\text{с.в}} T} - \frac{p_{\text{п}}}{T}\left(\frac{1}{R_{\text{с.в}}} - \frac{1}{R_{\text{п}}}\right) = \frac{0{,}00348}{T}(p - 0{,}376\, p_{\text{п}}). \qquad (4.14)$$

Для сухого воздуха $p_{\text{п}} = 0$, откуда следует, что плотность влажного воздуха всегда меньше плотности сухого воздуха при одинаковых температуре и давлении.

С учётом зависимости (4.13) формула (4.14) примет следующий вид:

$$\rho_{\text{вл.в}} = \rho'_{\text{с.в}}\left(\frac{1 + d}{1 + 1{,}6075d}\right),$$

где $\rho'_{\text{с.в}}$ – плотность сухого воздуха при температуре T и полном давлении воздуха p, $\rho'_{\text{с.в}} = 0{,}00348\frac{p}{T}$.

Относительная влажность воздуха φ и степень насыщения ψ определяются по формулам (4.7) и (4.8). Связь между ними, учитывая зависимость (4.12), определяется соотношением

$$\psi = \frac{d}{d_н} = \frac{p_п}{p_н}\frac{p - p_н}{p - p_п} = \varphi\frac{p - p_н}{p - p_п}. \qquad (4.15)$$

Так как $(p - p_н) < (p - p_п)$, то и $\psi < \varphi$. Для сухого воздуха при $p_п = 0$ $\psi = \varphi = 0$ и для насыщенного воздуха при $p_п = p_н$ $\psi = \varphi = 1$.

Каково расхождение между величинами φ и ψ в интересующем нас диапазоне температур?

Максимальное расхождение будет иметь место при $p_п \to 0$. В табл. 4.1 приведены значения $(p - p_н)/(p - p_п)$ при $p_п = 0$ и $p =$ = 101,3 кПа для диапазона температур от минус 50 до 50°С.

Таблица 4.1

Значения $(p - p_н)/(p - p_п)$

Температура t, °С	Значение $(p - p_н)/(p - p_п)$
50	0,88
40	0,93
30	0,96
25	0,97
20	0,98
10	0,99
0	0,994
–10	0,997
–20	0,998
–25	0,9993
–30	0,9996
–40	0,99987
–50	0,99996

Как видно из приведённых данных, максимально возможное расхождение имеет место при температуре t = 50°С и парциальном давлении водяного пара $p \to 0$. Это расхождение не превышает 12%. В то же время для диапазона температур от минус 25 до 25°С, который наиболее часто используется в метрологии и кондиционировании воздуха, расхождение составляет не более 3% (при $p_п \to 0$), а в области часто встречающихся влагосодержаний d = 5...15 г/кг с.в, что соответствует $p_п$ = 0,8 ... 2,4 кПа, это расхождение менее 1%. Таким образом, для области температур от минус 25 до 25°С относительная влажность воздуха φ и степень насыщения ψ практически не отличаются друг от друга.

Понятие относительной влажности воздуха φ, широко применяемое в метрологии, кондиционировании, холодильной и других областях техники, является малопонятным термином для широкого круга людей, не знакомых с термодинамикой влажного воздуха.

Термин степень насыщения ψ более доступен пониманию, так как он определяет отношение массы влаги, находящейся в воздухе, к массе влаги, которая может находиться в насыщенном водяными парами воздухе при той же температуре. Степень насыщения ψ является универсальной величиной. Последняя определяет состав влажного воздуха только в области ненасыщенного или насыщенного водяными парами воздуха, а степень насыщения ψ может быть использована как для гомогенной двухкомпонентной смеси, так и для гетерогенной смеси (двух- и трёхфазной системы), т. е. величина ψ может быть больше единицы: ψ >1.

Использование величины степени насыщения влажного воздуха ψ представляется рациональным и правильным, тем более, что одним из параметров, который используют для определения состояния влажного воздуха, является влагосодержание.

Величина удельной энтальпии влажного воздуха определяется по формуле (4.4). Для ненасыщенного влажного воздуха $h_{вл} = h_{п}$. С учётом выражений (2.3) и (3.28)

$$h_{вл.в} = \bar{c}_{p_{с.в}} t + d\left[\bar{c}_{p_в} t_н + r + \bar{c}_{p_п}\left(t - t_н\right)\right]. \qquad (4.16)$$

При $t_н < 0$°С энтальпия влажного ненасыщенного воздуха, имея в виду (3.30), определяется из выражения

$$h_{вл.в} = \bar{c}_{p_{с.в}} t + d\left[\bar{c}_{p_л} t_н - r_{пл_0} + r_{суб} + \bar{c}_{p_п}\left(t - t_н\right)\right]. \qquad (4.17)$$

Примеры

Пример 4.2. Ненасыщенный влажный воздух имеет температуру t = = 25°С и влагосодержание d = 0,014 кг вл/кг с.в.

Определить парциальное давление водяного пара $p_п$ (при p = 101,325 кПа), относительную влажность φ, степень насыщения ψ, газовую постоянную $R_{см}$, мольную массу $\mu_{см}$ и удельную энтальпию $h_{вл.в}$. При расчёте принять:

$$R_{с.в} = 287{,}06 \text{ Дж/(кг·К)}, \qquad R_п = 461{,}5 \text{ Дж/(кг·К)},$$

$$\mu_{с.в} = 28{,}964 \text{ кг/кмоль}, \qquad \mu_п = 18{,}016 \text{ кг/кмоль},$$

$$\bar{c}_{p_{с.в}} = 1{,}002 \text{ кДж/(кг·К)}, \quad \bar{c}_{p_в} = 4{,}19 \text{ кДж/(кг·К)}, \quad \bar{c}_{p_п} = 1{,}86 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

Парциальное давление водяного пара

$$p_п = p\frac{d}{0{,}6221 + d} = 101{,}325 \cdot \frac{0{,}014}{0{,}6221 + 0{,}014} = 2{,}23 \text{ кПа}.$$

Из таблиц термодинамических свойств воды и водяного пара (см. прилож.) или по формуле (3.12) находим давление насыщенного водяного пара $p_н$ при $t = 25°C$

$$p_н = 0{,}6112 \exp\frac{17{,}504 \cdot 25}{241{,}2 + 25} = 3{,}163 \text{ кПа}.$$

Относительная влажность воздуха

$$\varphi = \frac{p_п}{p_н} = \frac{2{,}23}{3{,}163} = 0{,}705.$$

Степень насыщения

$$\psi = \varphi\frac{p - p_н}{p - p_п} = 0{,}705 \cdot \frac{101{,}325 - 3{,}163}{101{,}325 - 2{,}23} = 0{,}698.$$

Газовая постоянная смеси

$$R_{см} = R_{с.в} + d\,R_п = 287{,}06 + 0{,}014 \cdot 461{,}5 = 293{,}5 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Мольная масса смеси

$$\mu_{см} = \mu_{с.в} + d\,\mu_п = 28{,}964 + 0{,}014 \cdot 18{,}016 = 29{,}216 \text{ кг/кмоль}.$$

Удельная энтальпия определяется по формуле (4.16). Входящая в формулу температура насыщения $t_н$ соответствует парциальному давлению $p_п$. Формулу (3.12) можно записать в следующем виде:

$$t_н = \frac{241{,}2 \ln\dfrac{p_п}{0{,}6112}}{17{,}504 - \ln\dfrac{p_п}{0{,}6112}}.$$

Тогда при $p_п = 2{,}23$ кПа

$$t_н = \frac{241{,}2 \ln\dfrac{2{,}23}{0{,}6112}}{17{,}504 - \ln\dfrac{2{,}23}{0{,}6112}} = 19{,}25°C.$$

При $t_н = 19{,}25°C$

$$r = 2500{,}64 - 2{,}369 t_н = 2455{,}04 \text{ кДж/кг}.$$

Удельная энтальпия ненасыщенного влажного воздуха при $t = 25°C$ и $d = 0{,}014$ кг вл/кг с.в

$$h_{вл.в} = 1{,}006 \cdot 25 + 0{,}014\left[4{,}19 \cdot 19{,}25 + 2455{,}04 + 1{,}86(25 - 19{,}25)\right] = 60{,}8 \text{ кДж/кг}.$$

Пример 4.3. Определить энтальпию влажного ненасыщенного воздуха при $t = 25°C$ и влагосодержании $d = 0{,}001$ кг вл/кг с.в ($p = 101{,}325$ кПа). При расчёте принять:

$$\bar{c}_{p_{с.в}} = 1{,}006 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}, \quad \bar{c}_{p_л} = 1{,}924 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}, \quad \bar{c}_{p_п} = 1{,}86 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)},$$

$$r_{пл0} = 334{,}11 \text{ кДж/кг}.$$

Парциальное давление водяного пара

$$p_п = p\frac{d}{0{,}6221 + d} = 101{,}325 \cdot \frac{0{,}001}{0{,}6221 + 0{,}001} = 0{,}1626 \text{ кПа}.$$

Так как при t = 0°С давление насыщения составляет 0,61 кПа, то при давлении $p_п$ = 0,1626 кПа температура насыщения будет отрицательной.

Используя формулу (3.12) с постоянными $\alpha_л$ и $\beta_л$ для льда, найдём температуру насыщения $t_н$

$$t_н = \frac{272{,}88 \ln \dfrac{0{,}1626}{0{,}6112}}{22{,}489 - \ln \dfrac{0{,}1626}{0{,}6112}} = -15{,}17\,°\mathrm{C}.$$

По формуле (3.14) определяем теплоту сублимации при $t_н = -15{,}17$°С

$$r_{суб} = 2834{,}75 - 0{,}1541 \cdot (-15{,}17) = 2837{,}09\ \text{кДж/кг}.$$

Удельная энтальпия, согласно (4.17),

$$h_{вл.в} = 1{,}006 \cdot 25 + 0{,}001\left[1{,}924(-15{,}17) - 334{,}11 + 2837{,}09 + 1{,}86(25 + 15{,}17)\right] = 27{,}7\ \text{кДж/кг}.$$

4.3.2. Насыщенный влажный воздух

Насыщенный влажный воздух представляет собой двухкомпонентную гомогенную парогазовую смесь, состоящую из сухого воздуха и насыщенного водяного пара. В этом случае парциальное давление водяного пара $p_п$ совпадает с давлением насыщения пара $p_н$ в смеси, т. е. $p_п = p_н$. Так как давление насыщенного водяного пара зависит только от температуры $p_н = f(T_н)$, то для определения тепловлажностного состояния насыщенного влажного воздуха достаточно знать два независимых термодинамических параметра, например, температуру и давление смеси.

Если обозначить массу насыщенного водяного пара через $m_н$, то формулы (4.11), (4.12), (4.13) и (4.14) примут вид

$$d_н = \frac{m_н}{m_{с.в}}, \quad d_н = 0{,}6221\frac{p_н}{p - p_н}, \quad p_н = p\frac{d_н}{0{,}6221 + d_н},$$

$$\rho''_{вл.в} = \frac{0{,}00348}{T}(p - 0{,}376\,p_н).$$

Газовая постоянная и мольная масса насыщенного влажного воздуха, соответственно,

$$R''_{см} = R_{с.в} + d_н R_п, \quad \mu''_{с.в} = \mu_{с.в} + d_н \mu_п.$$

Относительная влажность и степень насыщения, согласно (4.7), (4.8) и (4.15),

$$\varphi_н = \psi_н = 1.$$

Для насыщенного влажного воздуха $t = t_н$, поэтому формула для определения удельной энтальпии имеет вид

$$h''_{вл.в} = \bar{c}_{p_{с.в}} t + d_н(\bar{c}_{p_в} t + r).$$

При $t_н < 0$ удельная энтальпия определяется из выражения

$$h''_{вл.в} = \bar{c}_{p_{с.в}} t + d_н(\bar{c}_{p_л} t - r_{пл_0} + r_{суб}).$$

4.3.3. Пересыщенный влажный воздух

Пересыщенный влажный воздух представляет собой двухкомпонентную гомогенную парогазовую смесь, состоящую из сухого воздуха и пересыщенного водяного пара. Для рассматриваемого случая парциальное давление пересыщенного водяного пара $p_{пер}$ в смеси больше давления насыщенного водяного пара $p_н$ над плоской поверхностью, т. е. $p_{пер} > p_н$.

Для определения тепловлажностного состояния пересыщенного влажного воздуха необходимо знать три независимых термодинамических параметра.

Если обозначить массу пересыщенного водяного пара $m_{пер}$, а влагосодержание $d_{пер}$, то для определения остальных параметров могут быть использованы формулы для насыщенного влажного воздуха.

Относительная влажность $\varphi_{пер}$ и степень насыщения $\psi_{пер}$ для пересыщенного влажного воздуха больше единицы

$$\varphi_{пер} = \frac{p_{пер}}{p_н} > 1 \quad и \quad \psi = \frac{d_{пер}}{d_н} > 1.$$

Характеристикой степени пересыщения, принятой в теории образования аэрозолей [13, 17, 18], является величина S, представляющая собой отношение парциального давления пара в газовой смеси p к давлению насыщенного пара над плоской поверхностью $p_н$,

$$S = \frac{p}{p_н}.$$

Для влажного воздуха эта величина соответствует относительной влажности φ.

Как указывалось ранее, состояние пересыщенного влажного воздуха является метастабильным. При наличии во влажном воздухе невидимых ядер конденсации (пылинок, мельчайших капелек жидкости, газовых ионов, флуктуационных сгущений молекул пара) и при соответствующем критическом пересыщении пара $S_{кр}$ происходит его конденсация в объёме, приводящая к образованию тумана.

Естественно, что критическое пересыщение пара для плоской поверхности $S_{кр} = 1$, для вогнутой $S_{кр} < 1$, а для выпуклой поверхности, которую обычно имеют мельчайшие центры конденсации, $S_{кр} > 1$. Этим и объясняется то, что конденсация водяного пара в объёме и образование тумана происходят только в пересыщенном водяном паре. Чтобы пар конденсировался на центрах конденсации, имеющих выпуклую поверхность, пересыщение его должно быть больше единицы. Над вогнутой поверхностью воды (например, в капиллярных структурах) конденсация пара может происходить и при $S_{кр} < 1$.

4.4. Гетерогенная смесь влажного воздуха

4.4.1. Образование тумана

Конденсация водяного пара из влажного воздуха в объёме – наиболее распространённый способ образования тумана. Этот процесс происходит при наличии во влажном воздухе взвешенных посторонних ядер конденсации или при образовании самопроизвольно возникающих в результате флуктуаций молекул пара (зародышей) и при обязательном пересыщении водяного пара.

В тех случаях, когда образование капель происходит в результате конденсации пара на ядрах, процесс называют ***гетерогенной конденсацией***. Если образование капель происходит в результате конденсации пара на зародышах, то процесс называют ***гомогенной***, или ***спонтанной конденсацией***.

Гетерогенная конденсация пара включает в себя две стадии:

– образование пересыщенного пара;

– конденсацию водяного пара на ядрах с их ростом до размеров капель тумана.

Гомогенная конденсация пара включает в себя три стадии:

– образование пересыщенного пара;

– образование зародышей;

– конденсацию водяного пара на поверхности зародышей и их рост до размеров капель тумана.

Для ***гетерогенной конденсации*** справедливо уравнение [13]:

$$\frac{p_r}{p_н} = \frac{p_п}{p_н} = S,$$

где p_r – давление насыщенного водяного пара над ядром (каплей) конденсации; $p_н$ – давление насыщенного водяного пара над плоской поверхностью; S – пересыщение водяного пара.

Давление насыщенного водяного пара над каплей и пересыщение пара от её радиуса определяются из уравнения Кельвина (см. п. 3.2.2).

Если состояние, при котором пересыщение водяного пара во влажном воздухе больше величины S, рассчитанной по указанному уравнению, то на поверхности капель будет конденсироваться водяной пар, радиус капель будет увеличиваться и образуется туман.

Если же ядра конденсации (капли) имеют электрический заряд, то давление насыщенного водяного пара над такими каплями и пересыщение пара, соответствующее этому давлению, меньше, чем над незаряженными каплями такого же размера.

Зависимость пересыщения пара над каплей от её радиуса и электрического заряда выражается уравнением [13]

$$\ln S = \ln \frac{p_r}{p_н} = \frac{M}{RT\rho}\left(\frac{2\sigma}{r_к} - \frac{e^2}{8\pi r_к^4}\right),$$

где e – электрический заряд.

На рис. 4.1 приведена зависимость равновесного пересыщения водяного пара у поверхности капли от её радиуса для незаряженной капли (кривая *1*) и капли с единичным зарядом (кривая *2*) при T = 293 К. При радиусе капли больше 10^{-9} м влияние заряда практически не сказывается, а при меньших радиусах – имеет существенное значение. Пересыщение пара над незаряженной каплей быстро растёт с уменьшением радиуса, а для заряженных капель оно достигает максимального значения $S_{кр_{мах}} = 3{,}6$ (при r = $= 6{,}7 \cdot 10^{-10}$ м) и при дальнейшем уменьшении радиуса капли пересыщение снова падает.

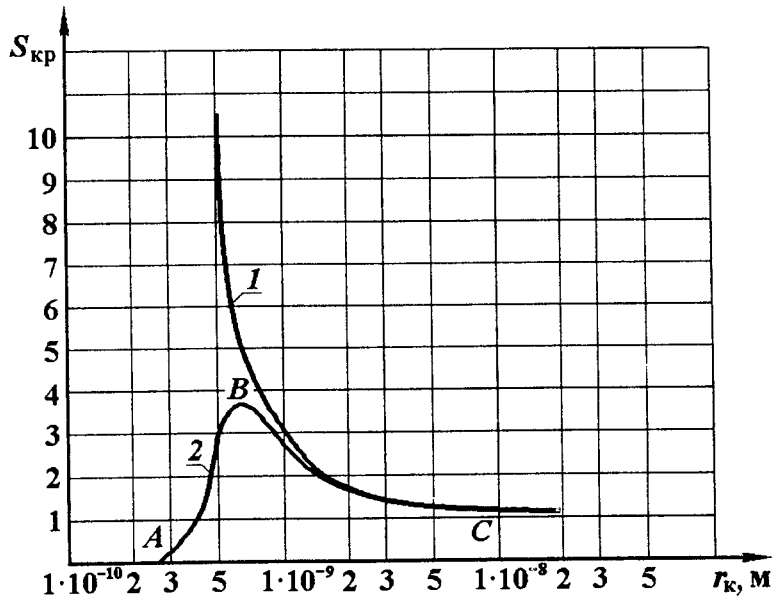


Рис. 4.1. Зависимость равновесного пересыщения пара у поверхности капли воды от её радиуса: *1* – незаряженная капля; *2* – капля с единичным зарядом

Следовательно, незаряженные капли не могут существовать в ненасыщенном влажном воздухе, тогда как заряженные капли могут быть при $S = 1$ и $S < 1$. В присутствии газовых ионов мелкие капли не испаряются, даже если влажный воздух не является насыщенным. Однако эти капли не могут вырасти до больших размеров, так как увеличение радиуса капли возможно лишь при $S > 1$ (участок *AB* кривой *2*). В случае создания необходимого перенасыщения водяного пара и прохождения состояния, характеризуемого точкой *B*, пар начнёт конденсироваться на каплях, и их размеры будут увеличиваться (кривая *BC*). Чем больше становится капля, тем меньше давление насыщенного пара над ней и тем меньше пересыщение, при котором растёт капля.

В атмосферном воздухе содержатся ядра конденсации радиусом $10^{-8} - 10^{-6}$ м. В соответствии с уравнением Кельвина, конденсация водяного пара на поверхности ядер конденсации, т. е. образование тумана, наступает при пересыщении $S = 1{,}001 \ldots 1{,}12$. Если же учесть, что ядра конденсации часто бывают заряжены, то конденсация пара будет иметь место при более низком пересыщении.

Численная концентрация ядер конденсации в атмосферном воздухе, т. е. количество ядер в 1 $м^3$, зависит от очень многих факторов – географического района, метеорологических условий, времени года, промышленных выбросов и т.д.

В табл. 4.2 приведены значения средней численной концентрации ядер конденсации в атмосферном воздухе различных местностей. Отклонения от среднего значения могут быть значительными и составлять один или два порядка.

Таблица 4.2

Концентрация ядер конденсации

Местность	Средняя численная концентрация, $м^{-3}$
Большой город	$1{,}5 \cdot 10^{10}$
Небольшой город	$3{,}4 \cdot 10^{10}$
Сельская местность	10^{10}
Острова	10^{10}
Океан	10^{9}

В зависимости от чистоты воздуха численная концентрация ионов изменяется примерно следующим образом:

	В обычном воздухе	В чистом воздухе
Лёгкие ионы, $м^{-3}$	несколько сот	несколько тысяч
Средние ионы, $м^{-3}$	до 10^{10}	менее 10^{8}
Тяжёлые ионы, $м^{-3}$	до $5 \cdot 10^{10}$	0

Лёгкие ионы несут единичный заряд. В результате соединения легких ионов со взвешенными в воздухе твёрдыми и жидкими частицами образуются средние и тяжёлые ионы, причём частицы радиусом менее 10^{-8} м приобретают элементарный заряд, а крупные частицы – несколько зарядов.

Гомогенная конденсация водяного пара происходит на самопроизвольно возникающих в результате флуктуации молекул пара зародышах во влажном воздухе, освобождённом от ионов и взвешенных частиц, при значительном пересыщении пара.

При флуктуационных сгущениях молекул размер первичных ядер конденсации составляет 10^{-9} м. Такой влажный воздух может быть получен только искусственным путём после специальной очистки.

Скорость образования зародышей I для практических расчётов может быть определена по формуле [13]

$$I = 0{,}562 \cdot 10^{26} \frac{\alpha}{\rho} \left(\frac{p}{T}\right)^2 (M\sigma)^{0{,}5} \exp\left[-A\left(1 - 3g^{-\frac{2}{3}} + 2g^{-1}\right)\right],$$

в которой величины A и g определяются из выражений

$$A = \frac{17{,}6 \cdot 10^{15}}{\ln^2 S}\left(\frac{M}{\rho}\right)^2\left(\frac{\sigma}{T}\right)^3 \quad \text{и} \quad g = \frac{35{,}2 \cdot 10^{15}}{\ln^3 S}\left(\frac{M}{\rho}\right)^2\left(\frac{\sigma}{T}\right)^3.$$

В вышеприведённых формулах приняты следующие обозначения: I – скорость образования зародышей; α – коэффициент конденсации, $\alpha = 0{,}04$; ρ – плотность воды; p – давление водяного пара; T – температура, К; M – масса 1 киломоля воды; σ – коэффициент поверхностного натяжения.

При гомогенной конденсации водяного пара под критическим пересыщением $S_{кр}$ понимают такое пересыщение, при котором скорость образования зародышей в единице объёма и в единицу времени, способных к дальнейшему росту, $I = 10^6$ м$^{-3}$·с$^{-1}$. Такое допущение является условным, так как процесс образования зародышей происходит и при $I < 10^6$, но скорость этого процесса мала. В табл. 4.3 приведены данные по скорости образования зародышей при гомогенной конденсации в зависимости от пересыщения пара. Так, при $S = 3{,}4$ величина $I = 10^6$ м$^{-3}$·с$^{-1}$, а при $S = 3{,}6$ величина $I = 1{,}2 \cdot 10^8$ м$^{-3}$·с$^{-1}$, т. е. скорость образования зародышей увеличилась в 120 раз.

Таблица 4.3

Зависимость скорости образования зародышей от пересыщения при $T = 293$ К

Пересыщение, S	Скорость образования зародышей I, м$^{-3}$·с$^{-1}$
3,2	$1{,}2 \cdot 10^2$
3,4	$1{,}0 \cdot 10^6$
3,6	$1{,}2 \cdot 10^8$
3,8	$9{,}9 \cdot 10^9$
4,0	$3{,}6 \cdot 10^{11}$
4,2	$8{,}9 \cdot 10^{12}$
4,4	$1{,}3 \cdot 10^{14}$

4.4.2. Характеристики тумана

К числу основных ***характеристик тумана*** относят:
– дисперсность;
– численную концентрацию;
– массовую концентрацию.

Дисперсность тумана определяется размером капель, из которых он состоит. Если радиус капель одинаковый, то такой туман называют ***монодисперсным***.

При разном диаметре капель туман является ***полидисперсным***.

Размер капель тумана изменяется в широких пределах – от $5\cdot10^{-10}-10^{-9}$ м до $10^{-5}-10^{-4}$ м [13]. Для природного тумана, согласно [18], дисперсность, или средний радиус капель, находится в пределах 7 – 15 мкм.

Численную концентрацию тумана, т. е. число капель воды в единице объёма влажного воздуха, обычно обозначают N. Единица – метр в минус третьей степени при нормальных условиях.

В атмосферном воздухе слабый туман наблюдается при $N=0{,}5\cdot10^{8}\ldots1\cdot10^{8}\,\text{м}^{-3}$, густой туман – при $N=0{,}5\cdot10^{8}\ldots6\cdot10^{8}\,\text{м}^{-3}$.

Как в природе, так и в лабораторной практике, численная концентрация тумана изменяется во времени. В период образования зародышей она повышается вследствие образования новых капель и одновременно уменьшается в результате коагуляции. После прекращения процесса образования новых капель численная концентрация начинает непрерывно уменьшаться вследствие коагуляции, осаждения и испарения капель.

Каждой скорости образования зародышей I соответствует строго определённая предельная численная концентрация [13]

$$N_{\text{пред}}=\sqrt{\frac{1}{K_0}},$$

где K_0 – константа коагуляции, $K_0\approx10^{-10}$.

Время τ, в течение которого $N_{\text{пред}}$ достигает постоянного значения, выражается уравнением

$$\tau=\frac{N_{\text{пред}}}{I}=(IK_0)^{-0,5}\approx10^{5}\cdot I^{-0,5}.$$

Массовая концентрация тумана, т. е. масса капель в единице объёма влажного воздуха, обозначается величиной ***G***. Единица – килограмм на метр в минус третьей степени.

Массовая концентрация тумана [13]

$$G = \frac{Mp_{\text{н}}}{R_{\text{п}}T}(S-1).$$

В большинстве случаев массовая концентрация тумана невелика, поэтому теплота конденсации, выделяющаяся при образовании частиц тумана, мала и её можно не учитывать.

Для природного тумана $G = (0{,}05 \ldots 1)\cdot 10^{-3}$ кг/м^3, для облаков $G = (0{,}2 \ldots 5)\cdot 10^{-3}$ кг/м^3.

Между дисперсностью, численной и массовой концентрациями существует зависимость, определяемая формулой [13]:

$$\bar{r} = \left(\frac{3G}{4\pi\rho N}\right)^{\frac{1}{3}},$$

где $\bar{r}$ – средний радиус капель.

Скорость осаждения капель тумана зависит от многих факторов – скорости движения воздуха и коагуляции капель, их размера и др.

О стоксовой скорости осаждения капель можно судить по следующим данным:

Радиус капель, м	Скорость осаждения, м/с
10^{-4}	1,2
10^{-5}	0,012
10^{-6}	0,00012

Приведённые цифры показывают, что скорость осаждения капель малого диаметра ($d < 2\cdot 10^{-6}$) ничтожна мала и время осаждения с уменьшением диаметра значительно увеличивается.

Нельзя представлять туман как что-то определённое, установившееся, неизменное. Рассматривая свойства тумана в каждом конкретном случае, необходимо иметь в виду условия его образования, размер и количество капель, особенности воздушной среды и т. д.

Важно отметить, что при гетерогенной конденсации диаметр капель может колебаться в пределах $10^{-8} - 10^{-6}$ м, а при гомогенной конденсации первичный диаметр капель составляет порядка 10^{-9} м.

Если воспользоваться уравнением Лапласа для определения давления внутри взвешенной в воздухе капли радиусом $r_к$, то можно, с учётом уравнения (3.21), построить зависимость температуры замерзания капли $t_{пл}$ от её радиуса r. Эта зависимость (см. табл. 3.14) представлена на рис. 4.2.

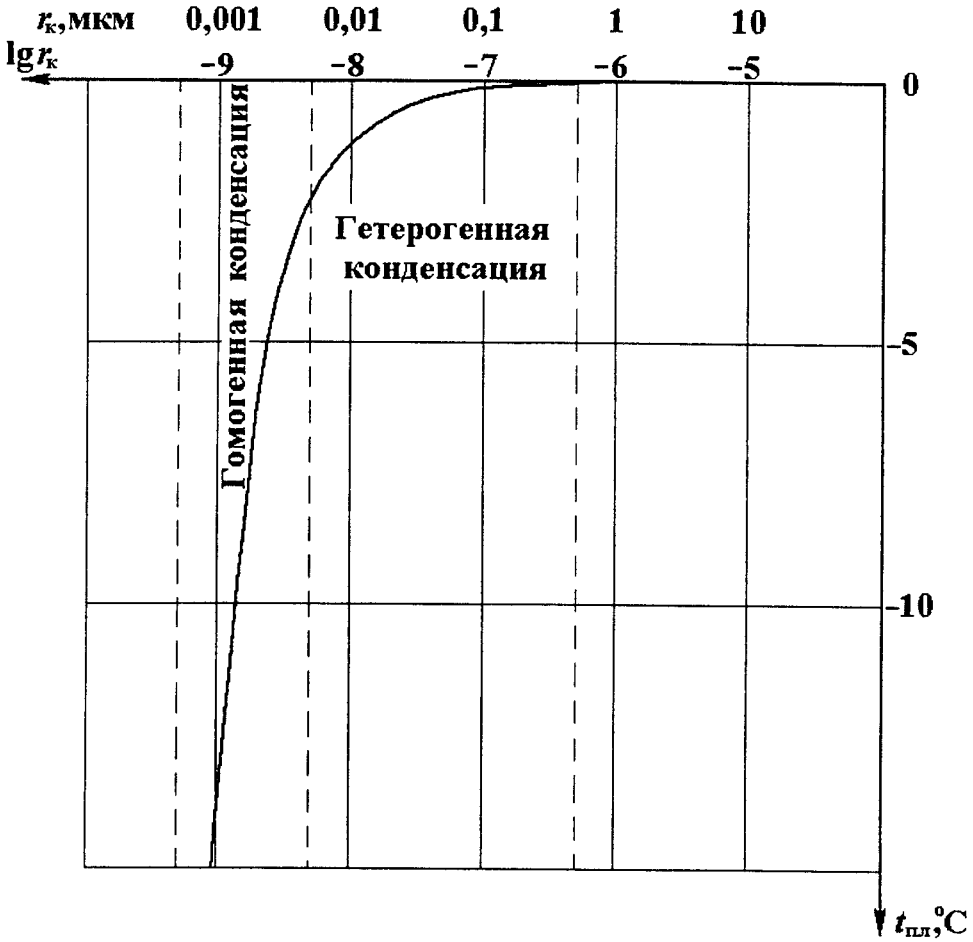


Рис. 4.2. Зависимость температуры замерзания капли $t_{пл}$ от её радиуса $r_к$

Из рисунка видно, что при гетерогенной конденсации ($r_к$ = $= 0{,}5 \cdot 10^{-6} \ldots 0{,}5 \cdot 10^{-8}$ м) температура замерзания лежит в пределах $t_{пл} = -2{,}36 \ldots -0{,}1$°C, а при гомогенной конденсации ($r_к = 0{,}5 \cdot 10^{-8} \ldots$ $\ldots 0{,}5 \cdot 10^{-9}$) – в диапазоне $t_{пл} = -22{,}0 \ldots -2{,}36$°C. При радиусе капель $r_к > 0{,}5 \cdot 10^{-6}$ м температура их замерзания практически $t_{пл} = 0$°C.

Изложенное позволяет утверждать, что в зависимости от структуры взвешенных в воздухе капель водяной и смешанный туманы могут существовать в зоне, охватывающей достаточно широкий диапазон отрицательных температур вплоть до $t = -22°C$. Учитывая, что процесс конденсации пара в воздухе обычно происходит и на поверхности невидимых ядер конденсации, и на флуктуационных сгущениях одновременно, следует отдать предпочтение существованию смешанного тумана.

Массовая концентрация тумана, т. е. масса капельной влаги, содержащейся в 1 м^3 воздуха, лежит в пределах $(0{,}05 \ldots 5)\cdot 10^{-3}$ кг/м^3. Нижний предел относится к слабому туману, верхний предел – к густому туману или туману, получаемому в лабораторных условиях.

4.4.3. Водяной туман

Водяной туман является гетерогенной смесью, состоящей из сухого воздуха, насыщенного водяного пара и взвешенных во влажном воздухе капель воды. Поэтому масса влаги $m_{вл}$ будет включать в себя массу насыщенного водяного пара $m_н$ и массу взвешенных капель воды $m_в$,

$$m_{вл} = m_н + m_в.$$

Влагосодержание водяного тумана

$$d_{в.т} = \frac{m_н + m_в}{m_{с.в}} = d_н + d_в,$$

где $d_в$ – отношение массы капельной влаги к массе сухого воздуха,

$$d_в = \frac{m_в}{m_{с.в}}.$$

Масса влажного воздуха $m_{вл.в}$ и его плотность $\rho_{вл.в}$ могут быть определены по формулам (4.2) и (4.3) при $d = d_{в.т}$.

Относительная влажность воздуха $\varphi = 1$, а степень насыщения

$$\psi = \frac{d_{в.т}}{d_н} = \frac{d_н + d_в}{d_н} = 1 + \frac{d_в}{d_н}. \qquad (4.18)$$

Удельная энтальпия водяного тумана определяется из выражения

$$h_{в.т} = h_{с.в} + d_н h'' + d_в h'.$$

С учётом формул (2.3), (3.8) и (3.22) удельная энтальпия водяного тумана

$$h_{\text{в.т}} = \bar{c}\, p_{\text{с.в}} t + d_{\text{н}}\left(\bar{c}\, p_{\text{в}} t_{\text{н}} + r\right) + d_{\text{в}} \bar{c}\, p_{\text{в}} t . \qquad (4.19)$$

При $t_{\text{н}} < 0$°С водяной туман может существовать при радиусе капель менее $r_{\text{к}} < 10^{-7}$ м. В этом случае энтальпия водяного тумана определяется из выражения

$$h_{\text{в.т}} = \bar{c}\, p_{\text{с.в}} t + d_{\text{н}}\left(\bar{c}\, p_{\text{л}} t_{\text{н}} - r_{\text{пл}_0} + r_{\text{суб}}\right) + d_{\text{в}} \bar{c}\, p_{\text{в}} t . \qquad (4.20)$$

Примеры

Пример 4.4. Определить общее влагосодержание $d_{\text{в.т}}$, степень насыщения ψ и энтальпию водяного тумана при $t = 20$°С, $d_{\text{в}} = 0{,}004$ кг вл/кг с.в и $r_{\text{к}} > 1$ мкм. Принять $p = 101{,}325$ кПа.

При $t = 20$°С парциальное давление насыщенного водяного пара $p_{\text{н}}$, согласно (3.12),

$$p_{\text{н}} = 0{,}6112 \exp\left(\frac{17{,}504 \cdot 20}{241{,}2 + 20}\right) = 2{,}335 \text{ кПа} .$$

При радиусе капель $r_{\text{к}} > 1$ мкм можно не учитывать влияние кривизны поверхности раздела фаз на давление насыщения (см. табл. 3.3). Тогда влагосодержание насыщенного воздуха

$$d_{\text{н}} = 0{,}6221 \frac{2{,}335}{101{,}325 + 2{,}335} = 0{,}014 \text{ кг вл/кг с.в} .$$

Общее влагосодержание

$$d_{\text{в.т}} = d_{\text{н}} + d_{\text{в}} = 0{,}014 + 0{,}004 = 0{,}018 \text{ кг вл/кг с.в} .$$

Степень насыщения воздуха влагой

$$\psi = \frac{d_{\text{в.т}}}{d_{\text{н}}} = \frac{0{,}018}{0{,}014} = 1{,}286 .$$

Энтальпия водяного тумана определяется по формуле (4.19) при $r = 2500{,}64 - 2{,}369 \cdot 20 = 2453{,}26$ кДж/кг

$$h_{\text{вт}} = 1{,}006 \cdot 20 + 0{,}014(4{,}186 \cdot 20 + 2453{,}26) + 0{,}004 \cdot 4{,}186 \cdot 20 = 55{,}97 \text{ кДж/кг}.$$

Энтальпия сухого воздуха составляет 35,95%, водяного насыщенного пара 63,46%, а капельной влаги 0,59% от энтальпии водяного тумана.

Пример 4.5. Определить степень насыщения ψ и энтальпию водяного тумана при $t = -5$°С, $d_{\text{в}} = 0{,}003$ кг вл/кг с.в, если туман состоит из монодисперсных капель с радиусом $r_{\text{к}} = 2 \cdot 10^{-9}$ м ($p = 101{,}325$ кПа, $r_{\text{пл}_0} = 334{,}11$ кДж/кг).

Из уравнения Лапласа при $\sigma = 75{,}5 \cdot 10^{-3}$ Н/м определяем давление внутри капли: $p_{\text{к}} = p + \dfrac{2\sigma}{r_{\text{к}}} = 101\,325 + \dfrac{2 \cdot 75{,}5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-9}} = 75\,601{,}3$ кПа.

Температура замерзания воды при давлении $p_к$, согласно (3.21),

$$t_{пл} = \left(0{,}075+1{,}382\cdot10^{-8}\cdot 75\,601{,}3\right)\left(1-0{,}0009869\cdot 75\,601{,}3\right) = -5{,}6\,°C.$$

Таким образом, при указанных условиях в воздухе действительно содержится капельная влага.

При t = –5°C парциальное давление насыщенного водяного пара над переохлаждённой водой составляет

$$p_н = 0{,}6112\exp\left[\frac{17{,}504\cdot(-5)}{241{,}2+(-5)}\right] = 0{,}422\text{ кПа}.$$

С учётом кривизны поверхности раздела фаз, давление насыщения, согласно (3.12),

$$p_{r_{кр}} = 0{,}422\exp\left(4{,}36\cdot10^{-6}\frac{75{,}5\cdot10^{-3}}{268{,}15\cdot2\cdot10^{-9}}\right) = 0{,}78\text{ кПа}.$$

Влагосодержание насыщенного воздуха

$$d_н = 0{,}6221\frac{0{,}78}{101{,}325-0{,}78} = 0{,}00483\text{ кг вл/кг с.в}.$$

Общее влагосодержание

$$d_{в.т} = 0{,}00483+0{,}003 = 0{,}00783\text{ кг вл/кг с.в}.$$

Степень насыщения

$$\psi = \frac{0{,}00783}{0{,}00483} = 1{,}62.$$

При t < 0°C энтальпия водяного тумана определяется по формуле (4.20) при $r_{суб} = 2834{,}75-0{,}1541(-5) = 2835{,}52$ кДж/кг

$h_{в.т}$ = 1,006(–5)+0,00483[1,924(–5)–334,11+2835,52]+0,003·4,186(–5) = 6,94 кДж/кг.

4.4.4. Ледяной туман

Ледяной туман – это гетерогенная смесь сухого воздуха, насыщенного водяного пара и взвешенных во влажном воздухе кристаллов льда.

Для ледяного тумана

$$m_{вл} = m_н + m_л;$$
$$d_{л.т} = d_н + d_л,$$

где $m_л$ – масса взвешенных в воздухе кристаллов льда; $d_{л.т}$ – влагосодержание ледяного тумана; $d_л$ – отношение массы кристаллов льда к массе сухого воздуха, $d_л = m_л/m_{с.в}$.

Величины $m_{вл.в}$ и $\rho_{вл.в}$ могут быть определены по формулам (4.2), (4.3) и (4.14) при $d = d_{л.т}$.

Относительная влажность воздуха $\varphi = 1$, степень насыщения

$$\psi = \frac{d_{\text{л.т}}}{d_{\text{н}}} = 1 + \frac{d_{\text{л}}}{d_{\text{н}}}. \qquad (4.21)$$

Удельная энтальпия ледяного тумана

$$h_{\text{л.т}} = h_{\text{с.в}} + d_{\text{н}} h'' + d_{\text{л}} h_{\text{л}}.$$

С учётом формул (2.3), (3.15) и (3.22) удельная энтальпия ледяного тумана может быть определена из следующего выражения:

$$h_{\text{л.т}} = \bar{c}_{p_{\text{с.в}}} t + d_{\text{н}}\left(\bar{c}_{p_{\text{л}}} t_{\text{н}} - r_{\text{пл}_0} + r_{\text{суб}}\right) + d_{\text{л}}\left(\bar{c}_{p_{\text{л}}} t - r_{\text{пл}_0}\right). \qquad (4.22)$$

4.4.5. Смешанный туман

Смешанный туман представляет собой гетерогенную смесь, состоящую из сухого воздуха, насыщенного водяного пара и взвешенных во влажном воздухе капель воды и кристаллов льда.

Для смешанного тумана

$$m_{\text{вл}} = m_{\text{н}} + m_{\text{в}} + m_{\text{л}};$$
$$d_{\text{см.т}} = d_{\text{н}} + d_{\text{в}} + d_{\text{л}}.$$

Масса влажного воздуха

$$m_{\text{вл.в}} = m_{\text{с.в}} + m_{\text{н}} + m_{\text{в}} + m_{\text{л}} = m_{\text{с.в}}\left(1 + d_{\text{см.т}}\right) = m_{\text{с.в}}\left(1 + d_{\text{н}} + d_{\text{в}} + d_{\text{л}}\right).$$

Плотность

$$\rho_{\text{вл.в}} = \rho_{\text{с.в}} + \rho_{\text{н}} + \rho_{\text{в}} + \rho_{\text{л}} = \rho_{\text{с.в}}\left(1 + d_{\text{см.т}}\right);$$

удельный объём

$$v_{\text{вл.в}} = \frac{1 + d_{\text{см.т}}}{\rho_{\text{вл.в}}}.$$

Относительная влажность $\varphi = 1$, степень насыщения

$$\psi = \frac{d_{\text{см.т}}}{d_{\text{н}}} = 1 + \frac{d_{\text{в}}}{d_{\text{н}}} + \frac{d_{\text{л}}}{d_{\text{н}}}. \qquad (4.23)$$

Удельная энтальпия смешанного тумана

$$h_{\text{см.т}} = h_{\text{с.в}} + d_{\text{н}} h'' + d_{\text{в}} h' + d_{\text{л}} h_{\text{л}}.$$

После подстановки соответствующих значений получим

$$h_{\text{см.т}} = \bar{c}_{p_{\text{с.в}}} t + d_{\text{н}}\left(\bar{c}_{p_{\text{л}}} t_{\text{н}} - r_{\text{пл}_0} + r_{\text{суб}}\right) + d_{\text{в}}\bar{c}_{p_{\text{в}}} t + d_{\text{л}}\left(\bar{c}_{p_{\text{л}}} t - r_{\text{пл}_0}\right). \qquad (4.24)$$

Для смешанного тумана обычно используют формулу

$$h_{\text{см.т}} = d_{\text{н}} r \; - d_{\text{л}} r_{\text{пл}0},$$

считая, что состояние смешанного тумана возможно только при t = = 0°С. Как было показано в п. 3.4, такое утверждение не является корректным, так как водяной или смешанный туманы могут существовать и при отрицательных температурах.

4.5. Расчётные формулы для определения энтальпии влажного воздуха

Формулы для определения энтальпии и энтропии влажного воздуха включают:

а) средние значения удельных массовых теплоёмкостей:

– сухого воздуха $\bar{c}_{p_{\text{с.в}}} = 1{,}006\ \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ для диапазона температур от минус 50 до 50°С;

– льда $\bar{c}_{p_{\text{л}}} = 1{,}924\ \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ для диапазона температур от минус 50 до 0°С;

– воды $\bar{c}_{p_{\text{в}}} = 4{,}186\ \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ для диапазона температур от 0 до 50°С;

– пара $\bar{c}_{p_{\text{п}}} = 1{,}86\ \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ для диапазона температур от минус 50 до 50°С;

б) постоянную величину теплоты плавления льда $r_{\text{пл}_0}$ = = 334,11 кДж/кг при температуре $t = 0°\text{C}$;

в) температуру влажного воздуха t, °С;

г) влагосодержание влажного воздуха d, кг вл/кг с.в;

д) температуру насыщения $t_{\text{н}}$, °С, соответствующую парциальному давлению водяного пара в воздухе $p_{\text{п}}$, Па;

е) теплоту парообразования r, кДж/кг, зависящую от температуры насыщения, $r = f(t_{\text{н}})$.

Величины $t_{\text{н}} = f(p_{\text{п}})$ и $r = f(t_{\text{н}})$ могут быть исключены из формул для определения энтальпии влажного воздуха.

Если воспользоваться уравнением Клапейрона–Клаузиуса (3.7) и проинтегрировать его в интервале от тройной точки (p_0 = = 0,61 кПа, t_0 = 0,01°С) до точки с текущими координатами $p_п$ и $t_н$, то получим:

при $r = \text{const}$, $v' << v''$ и $v'' = \dfrac{R_п T_н}{p_п}$

$$p_п = p_0 \exp\left(\frac{r}{R_п}\frac{T_н - T_0}{T_н T_0}\right); \qquad (4.25)$$

при $r = f(t_н)$, например, линейной зависимости $r = aT_н + b$, $v' << v''$ и $v'' = \dfrac{R_п T_н}{p_п}$ будем иметь

$$p_п = p_0 \exp\left(\frac{a}{R_п}\ln\frac{T_н}{T_0} + \frac{b}{R_п}\frac{T_н - T_0}{T_н T_0}\right). \qquad (4.26)$$

Из выражения (4.25) получим

$$T_н = \frac{T_0}{1 - T_0\dfrac{R_п}{r}\ln\dfrac{p_п}{p_0}},$$

а с учётом (4.13)

$$T_н = \frac{T_0}{1 - T_0\dfrac{R_п}{r}\ln\left(\dfrac{p}{p_0}\dfrac{d}{0{,}622 + d}\right)}. \qquad (4.27)$$

Используя выражение (4.27), формула для определения, например, энтальпии влажного ненасыщенного воздуха (4.16) при $r = \text{const}$ будет иметь следующий вид:

$$h_{вл.в} = \bar{c}_{p_{с.в}} t + d\left\{\bar{c}_{p_в}\left[\frac{T_0}{1 - T_0\dfrac{R_п}{r}\ln\left(\dfrac{p}{p_0}\dfrac{d}{0{,}622 + d}\right)} - 273{,}15\right] + r + \bar{c}_{p_п}\left[t - \frac{T_0}{1 - T_0\dfrac{R_п}{r}\ln\left(\dfrac{p}{p_0}\dfrac{d}{0{,}622 + d}\right)} + 273{,}15\right]\right\}.$$

Если же воспользоваться линейной зависимостью $r = aT_{\text{н}} + b$ и формулой (4.26) для более точного определения энтальпии влажного воздуха, то результат получится ещё более сложным и громоздким, весьма неудобным для практического использования.

Для получения простых и удобных для инженерных расчётов формул применяют:

– эмпирический метод с использованием зависимостей для теплоты парообразования или энтальпии пара;

– допущение, что перегретый водяной пар является идеальным газом и его энтальпия не зависит от давления.

При использовании метода обычно применяют эмпирическую зависимость $r = f(t_{\text{н}})$ в виде линейной функции $r = a + bt_{\text{н}}$. В этом случае энтальпию перегретого водяного пара можно представить в следующем виде:

$$h_{\text{п}} = \bar{c}_{p_{\text{в}}} t_{\text{н}} + a + bt_{\text{н}} + \bar{c}_{p_{\text{п}}} (t - t_{\text{н}}).$$

Например, используя зависимость $r = 2490{,}0 - 2{,}3t_{\text{н}}$ и соответствующие значения удельной массовой теплоёмкости [19], получают формулу

$$h_{\text{вл.в}} = 1{,}005t + d(4{,}19t_{\text{н}} + 2490 - 2{,}3t_{\text{н}} + 1{,}97t - 1{,}97t_{\text{н}}) =$$
$$= 1{,}005t + d(2490 + 1{,}97t - 0{,}08t_{\text{н}}).$$

Пренебрегая малой величиной $0{,}08t_{\text{н}}$, расчёт энтальпии влажного ненасыщенного воздуха ведут по формуле

$$h_{\text{вл.в}} = 1{,}005t + d(2490 + 1{,}97t).$$

При использовании допущения отсчёт энтальпии перегретого водяного пара осуществляют от состояния насыщения при температуре $t = 0°\text{C}$

$$h_{\text{п}} = r_0 + \bar{c}_{p_{\text{п}}} t, \qquad (4.28)$$

считая, что перегретый пар является идеальным газом и его энтальпия не зависит от давления.

Энтальпия водяного пара при давлении $p_0 = 0{,}61$ кПа и температуре t определяется точкой *1* на *T–s*-диаграмме рис. 4.3.

Состояние водяного пара при его парциальном давлении $p_{\text{п}}$ или $p'_{\text{п}}$ и той же температуре t характеризуется, соответственно, точками *2* и *3*.

Для идеального газа линии h = const и t = const совпадают, поэтому $h_1 = h_2 = h_3$. В действительности, в области, близкой к насыщению, линия постоянной энтальпии h_1 (кривая 2′–3′) незначительно отклоняется от изотермы (кривая *2–3*).

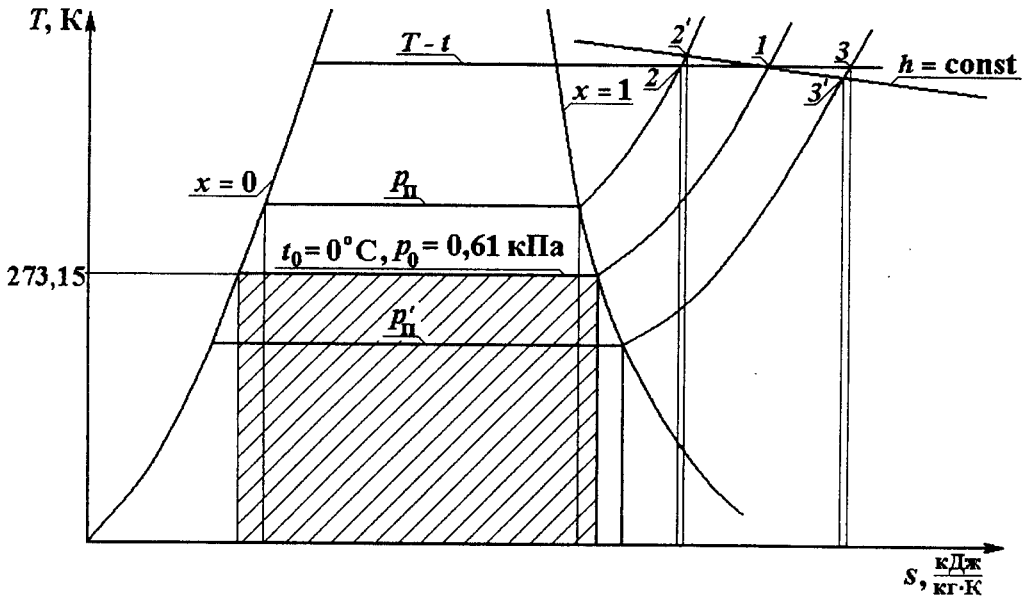


Рис. 4.3. Энтальпия перегретого водяного пара h

Энтальпия перегретого водяного пара при давлении $p_п$ составляет h'_2, а при давлении $p'_п$ составляет h'_3. Разность значений $h'_2 - h_2$ и $h_3 - h'_3$ весьма мала и на T–s-диаграмме изображается площадью под процессами *2–2′* и *3′–3*. Поэтому, особенно при малых давлениях $p_п$, можно с достаточной для технических расчётов точностью считать, что

$$h_1 = h_2 = h_3.$$

Так, применяя формулу (4.28) и считая, что $\bar{c}_{p_{с.в}} = 1{,}004$ кДж/(кг·К) и $\bar{c}_{p_п} = 1{,}86$ кДж/(кг·К), получают следующую зависимость для энтальпии влажного ненасыщенного воздуха [7]:

$$h_{вл.в} = 1{,}004t + d(2500 + 1{,}86t).$$

В табл. 4.4 приведены формулы для определения энтальпии влажного ненасыщенного воздуха, используемые различными авторами.

Таблица 4.4

Формулы для определения энтальпии влажного ненасыщенного воздуха

№ п.п.	Формула для определения энтальпии влажного ненасыщенного воздуха	Литературный источник	Используемый метод	Средние удельные значения массовой теплоёмкости, кДж/(кг·К)				Удельная теплота плавления льда при $t = 0$°С, кДж/кг	Диапазон применимости
				сухого воздуха $\bar{c}_{p_{с.в}}$.	льда $\bar{c}_{p_л}$.	воды $\bar{c}_{p_в}$.	водяного пара $\bar{c}_{p_п}$.		
1.	$h_{вл.в}=1{,}004t+(2500+1{,}86t)d$	[7]	Перегретый водяной пар–идеальный газ	1,004	2,05	4,19	1,86	333,0	Не указан
2.	$h_{вл.в}=1{,}01t+(2501+1{,}89t)d$	[4]	Перегретый водяной пар–идеальный газ	1,01	–	–	1,89	–	Не указан
3.	$h_{вл.в}=1{,}0t+(2500+1{,}89t)d$	[3]	Перегретый водяной пар–идеальный газ	1,00	2,10	4,19	1,89	335,0	Не указан
4.	$h_{вл.в}=1{,}005t+(2500+1{,}8t)d$	[21]	Перегретый водяной пар–идеальный газ	1,005	–	–	1,80	–	Не указан
5.	$h_{вл.в}=1{,}006t+(2500+1{,}86t)d$	[1]	Перегретый водяной пар–идеальный газ	1,006	2,05	4,19	1,86	333,4	(–50)–50°С
6.	$h_{вл.в}=1{,}005t+(2490+1{,}97t)d$	[19]	Эмпирические зависимости	1,005	2,095	4,19	1,97	333,0	Не указан
7.	$h_{вл.в}=1{,}0t+(2490+1{,}97t)d$	[10]	Эмпирические зависимости	1,00	–		–	–	Не указан
8.	$h_{вл.в}=1{,}0048t+(2491+1{,}88t)d$	[22]	Эмпирические зависимости	1,0048	–	–	1,884	–	(–50)–50°С
9.	$h_{вл.в}=1{,}0048t+(2491+1{,}968t)d$	[20]	Графоаналитический	1,0048	–	4,1868	1,884	–	Не указан

Все зависимости дают практически одинаковые результаты. Например, при $t = 50\,^{\circ}\mathrm{C}$ и $d = 0{,}02$ кг/кг формула, приведенная в [4], даёт значение энтальпии влажного воздуха $h_{\text{вл.в}} = 102{,}41$ кДж/кг, а по формуле, приведенной в [20], получаем $h_{\text{вл.в}} = 101{,}88$ кДж/кг. Расхождение составляет 0,5%.

Во всех приведённых формулах значения средних удельных массовых теплоёмкостей сухого воздуха $\bar{c}_{p_{\text{с.в}}}$ и водяного пара $\bar{c}_{p_{\text{п}}}$ неодинаковы, результаты, получаемые при использовании эмпирических зависимостей, разные. Не для всех формул указан диапазон применимости. И хотя это практически не влияет на получаемые результаты и не носит принципиального характера, желательно все-таки иметь формулу с точным указанием диапазона её применимости и соответствующими этому диапазону значениями средних удельных массовых теплоёмкостей.

Если использовать эмпирическую зависимость (3.17) для удельной теплоты парообразования при $t_{\text{н}} > 0$ и соответствующие значения средних удельных теплоёмкостей:

– сухого воздуха

$$\bar{c}_{p_{\text{с.в}}} = 1{,}006\ \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}),$$

– воды

$$\bar{c}_{p_{\text{в}}} = 4{,}186\ \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$$

– пара

$$\bar{c}_{p_{\text{п}}} = 1{,}86\ \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}),$$

то формула (4.16) примет вид

$$h_{\text{вл.в}} = 1{,}006t + d\left[4{,}186t_{\text{н}} + 2500{,}64 - 2{,}369t_{\text{н}} + 1{,}86\ (t - t_{\text{н}})\right] =$$

$$= 1{,}006t + d\left(2500{,}64 + 1{,}86t - 0{,}043t_{\text{н}}\right).$$

При использовании эмпирической зависимости (3.14) для удельной теплоты сублимации при $t_{\text{н}} < 0$ и значениях

$$r_{\text{пл}_0} = 334{,}11\ \text{кДж/кг};$$

$$\bar{c}_{p_{\text{л}}} = 1{,}924\ \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$$

формула (4.17) может быть записана следующим образом:

$$h_{\text{вл.в}} = 1{,}006t + d\left[1{,}924t_{\text{н}} - 334{,}11 + 2834{,}75 - 0{,}1541t_{\text{н}} + 1{,}86\ (t - t_{\text{н}})\right] =$$
$$= 1{,}006t + d\left(2500{,}64 + 1{,}86t - 0{,}09t_{\text{н}}\right).$$

Третье слагаемое в скобках в вышеприведённых формулах практически не влияет на результат вычисления энтальпии влажного воздуха. Так, например, даже при $t = 0°\text{C}$ и $t_{\text{н}} = -50°\text{C}$ сумма в скобках соответственно составляет 2502,79 кДж/кг и 2505,14 кДж/кг . Расхождение в значениях составляет 0,1%.

Пренебрегая малыми величинами $0{,}043t_{\text{н}}$ и $0{,}09t_{\text{н}}$, формула для определения энтальпии влажного воздуха примет вид

$$h_{\text{вл.в}} = 1{,}006t + d\left(2500{,}64 + 1{,}86t\right).$$

При допущении, что перегретый водяной пар является идеальным газом, имеем

$$h_{\text{вл.в}} = 1{,}006t + d\left(2500{,}64 + 1{,}86t\right).$$

В общем виде формула для влажного ненасыщенного воздуха для диапазона температур (–50) – 50°С может быть представлена так:

$$h_{\text{вл.в}} = \bar{c}_{p_{\text{с.в}}} t + d\left(r_0 + \bar{c}_{p_{\text{п}}} t\right). \qquad (4.29)$$

С учётом формулы (4.29) зависимости для определения энтальпии влажного воздуха примут следующий вид:

– для насыщенного влажного воздуха

$$h''_{\text{вл.в}} = \bar{c}_{p_{\text{с.в}}} t + d_{\text{н}}\left(r_0 + \bar{c}_{p_{\text{п}}} t\right); \qquad (4.30)$$

– для водяного тумана

$$h_{\text{в.т}} = \bar{c}_{p_{\text{с.в}}} t + d_{\text{н}}\left(r_0 + \bar{c}_{p_{\text{п}}} t\right) + d_{\text{в}}\bar{c}_{p_{\text{в}}} t; \qquad (4.31)$$

– для ледяного тумана

$$h_{\text{л.т}} = \bar{c}_{p_{\text{с.в}}} t + d_{\text{н}}\left(r_0 + \bar{c}_{p_{\text{п}}} t\right) + d_{\text{л}}\left(\bar{c}_{p_{\text{л}}} t - r_{\text{пл}_0}\right); \qquad (4.32)$$

– для смешанного тумана

$$h_{\text{см.т}} = \bar{c}_{p_{\text{с.в}}} t + d_{\text{н}}\left(r_0 + \bar{c}_{p_{\text{п}}} t\right) + d_{\text{в}}\bar{c}_{p_{\text{в}}} t + d_{\text{л}}\left(\bar{c}_{p_{\text{л}}} t - r_{\text{пл}_0}\right). \qquad (4.33)$$

Для диапазона температур (– 50) – 50°С следует принимать

$\bar{c}_{p_{\text{с.в}}} = 1{,}006\,\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; $\bar{c}_{p_{\text{п}}} = 1{,}86\,\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$;

$\bar{c}_{p_{\text{в}}} = 4{,}186\,\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; $\bar{c}_{p_{\text{л}}} = 1{,}924\,\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$;

$r_0 = 2500{,}64\,\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; $r_{\text{пл}_0} = 334{,}11\,\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

4.6. Энтропия влажного воздуха

Влажный ненасыщенный воздух можно рассматривать как идеальную газовую смесь, состоящую из двух компонентов: сухого воздуха и водяного пара. В этом случае для энтропии влажного воздуха справедливо выражение

$$S_{\text{вл.в}}(T, V) = S_{\text{с.в}}(T, V) + S_{\text{п}}(T, V),$$

т. е. энтропия влажного ненасыщенного воздуха равна сумме энтропий сухого воздуха и водяного пара, соответствующих температуре и объёму смеси.

Для удельных значений энтропии справедливо соотношение

$$s_{\text{вл.в}}(T, p) = g_{\text{с.в}} s_{\text{с.в}}(T, p_{\text{с.в}}) + g_{\text{п}} s_{\text{п}}(T, p_{\text{п}}), \qquad (4.34)$$

которое соответствует формуле (4.5).

Таким образом, удельная энтропия влажного воздуха, отнесённая к 1 кг сухого воздуха, равна сумме энтропий сухого воздуха и водяного пара при температуре смеси и парциальных давлениях компонентов смеси.

Следовательно:

– для сухого воздуха: $s_{\text{с.в}} = s_{0_{\text{с.в}}} + \bar{c}_{p_{\text{с.в}}} \ln\frac{T}{T_0} - R_{\text{с.в}} \ln\frac{p_{\text{с.в}}}{p_{0_{\text{с.в}}}}$;

– для водяного пара: $s_{\text{п}} = s_{0_{\text{п}}} + \bar{c}_{p_{\text{п}}} \ln\frac{T}{T_0} - R_{\text{п}} \ln\frac{p_{\text{п}}}{p_{0_{\text{п}}}}$.

Если принять за начало отсчёта энтропий значения $t_0 = 0°\text{C}$ ($T_0 = 273{,}15$ К) и $p_{0_{\text{п}}} = 610$ Па, то, согласно (2.4) и (3.24), $s_{0_{\text{п}}} = \frac{r_0}{273{,}15}$, $s_{0_{\text{с.в.}}} = 0$ и формулы можно переписать в следующем виде:

$$s_{\text{с.в}} = \bar{c}_{p_{\text{с.в}}} \ln\frac{T}{273{,}15} - R_{\text{с.в}} \ln\frac{p - p_{\text{п}}}{p - 610};$$

$$s_{\text{п}} = \frac{r_0}{273{,}15} + \bar{c}_{p_{\text{п}}} \ln\frac{T}{273{,}15} - R_{\text{п}} \ln\frac{p_{\text{п}}}{610}.$$

Тогда энтропия влажного ненасыщенного воздуха, отнесённая к 1кг сухого воздуха, будет определяться из выражения

$$s_{\text{вл.в}} = \bar{c}\,_{p_{\text{с.в}}} \ln\frac{T}{273{,}15} - R_{\text{с.в}} \ln\frac{p - p_{\text{п}}}{p - 610} + \\ + d\left(\frac{r_0}{273{,}15} + \bar{c}\,_{p_{\text{п}}} \ln\frac{T}{273{,}15} - R_{\text{п}} \ln\frac{p_{\text{п}}}{610}\right). \qquad (4.35)$$

Для насыщенного влажного воздуха

$$s''_{\text{вл.в}} = \bar{c}\,_{p_{\text{с.в}}} \ln\frac{T}{273{,}15} - R_{\text{с.в}} \ln\frac{p - p_{\text{н}}}{p - 610} + \\ + d_{\text{н}}\left(\frac{r_0}{273{,}15} + \bar{c}\,_{p_{\text{п}}} \ln\frac{T}{273{,}15} - R_{\text{п}} \ln\frac{p_{\text{н}}}{610}\right). \qquad (4.36)$$

Для водяного тумана

$$s_{\text{в.т}} = \bar{c}\,_{p_{\text{с.в}}} \ln\frac{T}{273{,}15} - R_{\text{с.в}} \ln\frac{p - p_{\text{н}}}{p - 610} + \\ + d_{\text{н}}\left(\frac{r_0}{273{,}15} + \bar{c}\,_{p_{\text{п}}} \ln\frac{T}{273{,}15} - R_{\text{п}} \ln\frac{p_{\text{н}}}{610}\right) + d_{\text{в}}\bar{c}\,_{p_{\text{в}}} \ln\frac{T}{273{,}15}. \qquad (4.37)$$

Для ледяного тумана

$$s_{\text{л.т}} = \bar{c}\,_{p_{\text{с.в}}} \ln\frac{T}{273{,}15} - R_{\text{с.в}} \ln\frac{p - p_{\text{н}}}{p - 610} + \\ + d_{\text{н}}\left(\frac{r_0}{273{,}15} + \bar{c}\,_{p_{\text{п}}} \ln\frac{T}{273{,}15} - R_{\text{п}} \ln\frac{p_{\text{н}}}{610}\right) + \\ + d_{\text{л}}\left(\bar{c}\,_{p_{\text{л}}} \ln\frac{T}{273{,}15} - \frac{r_{\text{пл}_0}}{273{,}15}\right). \qquad (4.38)$$

Для смешанного тумана

$$s_{\text{см.т}} = \bar{c}\,_{p_{\text{с.в}}} \ln\frac{T}{273{,}15} - R_{\text{с.в}} \ln\frac{p - p_{\text{н}}}{p - 610} + \\ + d_{\text{н}}\left(\frac{r_0}{273{,}15} + \bar{c}\,_{p_{\text{п}}} \ln\frac{T}{273{,}15} - R_{\text{п}} \ln\frac{p_{\text{н}}}{610}\right) + \\ + d_{\text{в}}\bar{c}\,_{p_{\text{в}}} \ln\frac{T}{273{,}15} + d_{\text{л}}\left(\bar{c}\,_{p_{\text{л}}} \ln\frac{T}{273{,}15} - \frac{r_{\text{пл}_0}}{273{,}15}\right). \qquad (4.39)$$

Примеры

Пример 4.6. Определить энтропию влажного ненасыщенного воздуха для данных примеров 4.2 и 4.3.

Используя формулу (4.2), будем иметь:

– для данных примера 4.2

$$s_{\text{вл.в}} = 1{,}006\ln\frac{298{,}15}{273{,}15} - 0{,}287\ln\frac{101{,}325-2{,}33}{101{,}325-0{,}61} +$$

$$+0{,}014\left(\frac{2500{,}64}{273{,}15} + 1{,}86\ln\frac{298{,}15}{273{,}15} - 0{,}4615\ln\frac{2{,}23}{0{,}61}\right) = 0{,}2148\ \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К});$$

– для данных примера 4.3

$$s_{\text{вл.в}} = 1{,}006\ln\frac{298{,}15}{273{,}15} - 0{,}287\ln\frac{101{,}325-0{,}1625}{101{,}325-0{,}61} +$$

$$+0{,}001\left(\frac{2500{,}64}{273{,}15} + 1{,}86\ln\frac{298{,}15}{273{,}15} - 0{,}4615\ln\frac{0{,}1626}{0{,}61}\right) = 0{,}097\ \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Пример 4.7. Определить энтропию водяного тумана для данных примеров 4.4 и 4.5.

Используя формулу (4.37) для данных примера 4.4, получим следующее значение энтропии:

$$s_{\text{в.т}} = 1{,}006\ln\frac{293{,}15}{273{,}15} - 0{,}287\ln\frac{101{,}325-2{,}335}{101{,}325-0{,}61} +$$

$$+0{,}014\left(\frac{2500{,}64}{273{,}15} + 1{,}86\ln\frac{293{,}15}{273{,}15} - 0{,}4615\ln\frac{2{,}335}{0{,}61}\right) + 0{,}004\cdot 4{,}186\ln\frac{293{,}15}{273{,}15} =$$

$$= 0{,}1986\ \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Для данных примера 4.5 будем иметь:

$$s_{\text{в.т}} = 1{,}006\ln\frac{268{,}15}{273{,}15} - 0{,}287\ln\frac{101{,}325-0{,}78}{101{,}325-0{,}61} +$$

$$+0{,}00483\left(\frac{2500{,}64}{273{,}15} + 1{,}86\ln\frac{268{,}15}{273{,}15} - 0{,}4615\ln\frac{0{,}78}{0{,}61}\right) + 0{,}003\cdot 4{,}186\ln\frac{268{,}15}{273{,}15} =$$

$$= 0{,}025\ \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

4.7. Эксергия влажного воздуха

4.7.1. Общие положения

Эксергия - это свойство термодинамической системы или потока энергии, определяемое количеством работы, которое может быть получено внешним приёмником энергии при обратимом их взаимодействии с окружающей средой до установления полного равновесия [23].

Термодинамическая система, рассматриваемая в эксергетическом анализе, может быть как очень простой, например, некоторое количество влажного воздуха в замкнутом объёме, так и достаточно сложной, как, например, система комфортного кондиционирования воздуха, включающая комплекс аппаратов для тепловлажностной обработки воздуха, его перемещения и т. д.

Система может быть закрытой, т. е. без обмена вещества с внешней средой, и открытой, когда этот обмен происходит.

Принято считать, что параметры окружающей среды не зависят от параметров рассматриваемой термодинамической системы. Это означает, что среда является настолько большой, что воздействие системы не вызывает в ней каких-либо изменений.

В подавляющем большинстве задач для полной характеристики окружающей среды (воздушной атмосферы) достаточно знать не более трёх параметров: температуру $T_{o.c}$, давление $p_{o.c}$ и влагосодержание $d_{o.c}$ (или относительную влажность $\varphi_{o.c}$).

До тех пор, пока все интенсивные параметры рассматриваемой термодинамической системы не сравняются с соответствующими параметрами окружающей среды, система в обратимом взаимодействии со средой может произвести и отдать некоторое количество энергии в форме внешней работы. Это означает, что система обладает определённой эксергией.

Эксергия системы определяется не только действием самой системы, но и действием окружающей среды. В ряде случаев система, не отдавая энергии, может производить работу за счёт окружающей среды. Примером такой системы является влажный воздух в герметичном помещении, у которого температура и влагосодержание одинаковы с температурой и влагосодержанием окружающего воздуха, а давление меньше атмосферного.

При полном равновесии системы и окружающей среды эксергия равна нулю. Такое состояние системы называется нулевым.

Эксергия вещества – это максимальная работа, которую это вещество может совершить в обратимом процессе с окружающей средой, если в конце этого процесса все участвующие в нём виды вещества приходят в состояние термодинамического равновесия со всеми компонентами окружающей среды, принимаемой за начало отсчёта.

Если термодинамическая система с параметрами p_1 и T_1 находится в окружающей среде с параметрами $p_{o.c}$ и $T_{o.c}$, то система будет совершать работу до тех пор, пока не придёт в равновесие с окружающей средой: $p = p_{o.c}$, $T = T_{o.c}$, где p, T – параметры системы, изменяющиеся в процессе. Максимальная работа совершается при обратимом переходе. Обратимый переход системы из произвольного начального состояния в состояние равновесия с окружающей средой можно совершить двумя процессами: обратимым адиабатным расширением (сжатием) до температуры $T_{o.c}$ и последующим изотермическим отводом (подводом) теплоты при бесконечно малой разности температур $T - T_{o.c} \to 0$.

Максимальная полезная работа для обратимого процесса

$$l_{п} = \int_{p_1, T_1}^{p_{o.c}, T_{o.c}} (T\,\mathrm{d}s - \mathrm{d}h).$$

Интеграл равен сумме четырёх интегралов (a – промежуточное состояние):

– для обратимого адиабатного процесса $s_1 = s_a = \text{const}$

$$\int_1^a T\mathrm{d}s = 0; \quad -\int_1^a \mathrm{d}h = h_1 - h_a;$$

– для обратимого изотермического процесса $T_{o.c} = T_0 = \text{const}$

$$\int_a^{o.c} T\mathrm{d}s = T_{o.c}(s_{o.c} - s_a) = T_{o.c}(s_{o.c} - s_1); \quad -\int_a^{o.c} \mathrm{d}h = h_a - h_{o.c}.$$

После суммирования получаем следующее выражение:

$$l_{п} = (h_1 - h_{o.c}) - T_0(s_1 - s_{o.c}). \qquad (4.40)$$

Формула (4.40) выражает максимальную полезную работу через начальные параметры системы и параметры окружающей среды. Для произвольного начального состояния с параметрами p, T или $h(p,T)$, $s(p,T)$ получаем функцию

$$e = (h - h_{\text{о.с}}) - T_{\text{о.с}}(s - s_{\text{о.с}}), \qquad (4.41)$$

именуемую эксергией потока и определяемую параметрами состояния термодинамической системы и параметрами окружающей среды.

Вычисление эксергии влажного воздуха представляет специфическую задачу. За начало отсчёта необходимо принимать состояние влажного атмосферного воздуха, температура и влажность которого меняются в широких пределах не только в зависимости от времени, но и от погодных и климатических условий. Пренебречь этими изменениями нельзя, так как температура и влажность воздуха в таких процессах, как кондиционирование, отопление или вентиляция, для анализа которых используется эксергия влажного воздуха, могут незначительно отличаться от параметров окружающего атмосферного воздуха. Неучёт даже небольших изменений параметров окружающей среды может привести к существенным ошибкам.

Эксергия влажного воздуха определяется шестью переменными: температурой $T_{\text{о.с}}$, влагосодержанием $d_{\text{о.с}}$ и давлением $p_{\text{о.с}}$ окружающего атмосферного воздуха; температурой T, влагосодержанием d и давлением p влажного воздуха.

В соответствии с классификацией, предложенной в [23], эксергия потока влажного воздуха состоит из двух составляющих: термомеханической, которая связана с различием термических (ΔT) и механических (Δp) параметров влажного воздуха и окружающей среды, и концентрационной (Δd).

В большинстве случаев считают, что давление атмосферного воздуха и воздуха, обрабатываемого в процессах кондиционирования, отопления или вентиляции, одинаково, т. е. $p_{\text{о.с}} = p$, что позволяет при определении эксергии учитывать только две её составляющих: термическую и концентрационную.

Общая формула (4.41), определяющая эксергию потока влажного воздуха, может быть записана в следующем виде:

$$e_{\text{вл.в}} = (h_{\text{вл.в}} - h_{\text{о.с}}) - T_{\text{о.с}}(s_{\text{вл.в}} - s_{\text{о.с}}). \qquad (4.42)$$

Здесь так же, как и для энтальпии и энтропии, удельная эксергия влажного воздуха отнесена к 1кг сухого воздуха.

4.7.2. Эксергия влажного ненасыщенного воздуха

Расчёт эксергии влажного воздуха ведётся во всех случаях по формуле (4.42).

Энтальпия влажного ненасыщенного воздуха, согласно (4.4), при $h_{вл} = h_п$

$$h_{вл.в} = h_{с.в} + dh_п.$$

Для энтропии, согласно (4.5), при $s_{вл} = s_п$

$$s_{вл.в} = s_{с.в} + ds_п.$$

Энтальпия и энтропия атмосферного воздуха (окружающей среды) соответственно равны

$$h^{о.с}_{вл.в} = h^{о.с}_{с.в} + d_{о.с} h^{о.с}_п,$$

$$s^{о.с}_{вл.в} = s^{о.с}_{с.в} + d_{о.с} s^{о.с}_п.$$

Используя вышеприведённые зависимости, формулу (4.42) для эксергии потока влажного воздуха можно представить в следующем виде:

$$e_{вл.в} = \Delta h_{с.в} + d\Delta h_п - T_{о.с}\left(\Delta s_{с.в} + d\Delta s_п\right) + \Delta d\left(h^{о.с}_п - T_{о.с} s^{о.с}_п\right), \quad (4.43)$$

где $\Delta h_{с.в} = h_{с.в} - h^{о.с}_{с.в}$, $\Delta h_п = h_п - h^{о.с}_п$, $\Delta s_{с.в} = s_{с.в} - s^{о.с}_{с.в}$, $\Delta s_п = s_п - s^{о.с}_п$, $\Delta d = d - d_{о.с}$.

Последнее слагаемое в формуле (4.43) представляет собой ту эксергию, которая вводится в систему или выводится из неё через контрольную поверхность с массой пара Δd. Физически это означает, что влагосодержание атмосферного воздуха изменилось с $d_{о.с}$ на d, а масса – с $(1+d_{о.с})$ на $(1+d)$ из-за того, что величина Δd, которую вывели из потока влажного воздуха, пересекла границу термодинамической системы. И наоборот, влагосодержание потока влажного воздуха изменилось с d на $d_{о.с}$, а масса – с $(1+d)$ на $(1+d_{о.с})$ в результате ввода величины Δd из атмосферного воздуха. Это слагаемое представляет собой изобарно-изотермический потенциал водяного пара при условиях окружающей среды, когда он совпадает с эксергией.

Поскольку за точку отсчёта эксергии принято состояние влажного воздуха в окружающей среде, то изобарно-изотермический потенциал водяного пара в среде следует приравнять к нулю. Последнее условие и определяет выбор точки отсчёта энтальпии и энтропии водяного пара: она должна быть такой, чтобы изобарно-изотермический потенциал (функция Гиббса) водяного пара при параметрах среды равнялся нулю. Этому условию, в частности, удовлетворяет точка с параметрами $t = 0°C$ и $p = 100$ кПа [24].

С учётом изложенного, эксергия ненасыщенного влажного воздуха будет определяться по формуле

$$e_{\text{вл.в}} = \Delta h_{\text{с.в}} + d\Delta h_{\text{п}} - T_{\text{о.с}}\left(\Delta s_{\text{с.в}} + d\Delta s_{\text{п}}\right). \qquad (4.44)$$

Имея в виду значения энтальпии и энтропии для сухого воздуха и водяного пара, можно записать

$$\Delta h_{\text{с.в}} = \bar{c}_{p_{\text{с.в}}}\left(T - T_{\text{о.с}}\right), \qquad \Delta h_{\text{п}} = \bar{c}_{p_{\text{п}}}\left(T - T_{\text{о.с}}\right),$$

$$\Delta s_{\text{с.в}} = \bar{c}_{p_{\text{с.в}}} \ln\frac{T}{T_{\text{о.с}}} - R_{\text{с.в}} \ln\frac{p - p_{\text{п}}}{p_{\text{о.с}} - p_{\text{п}}^{\text{о.с}}}, \quad \Delta s_{\text{п}} = \bar{c}_{p_{\text{п}}} \ln\frac{T}{T_{\text{о.с}}} - R_{\text{п}} \ln\frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{п}}^{\text{о.с}}}.$$

Тогда

$$e_{\text{вл.в}} = \bar{c}_{p_{\text{с.в}}}\left(T - T_{\text{о.с}}\right) + \bar{c}_{p_{\text{п}}}\left(T - T_{\text{о.с}}\right)d -$$

$$- T_{\text{о.с}}\left[\bar{c}_{p_{\text{с.в}}} \ln\frac{T}{T_{\text{о.с}}} - R_{\text{с.в}} \ln\frac{p - p_{\text{п}}}{p_{\text{о.с}} - p_{\text{п}}^{\text{о.с}}} + d\left(\bar{c}_{p_{\text{п}}} \ln\frac{T}{T_{\text{о.с}}} - R_{\text{п}} \ln\frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{п}}^{\text{о.с}}}\right)\right].$$

Используя зависимость (4.12) для влагосодержания воздуха, расчётная формула для определения эксергии влажного воздуха после простых алгебраических преобразований примет вид

$$e_{\text{вл.в}} = T_{\text{о.с}}\left\{\begin{array}{l}\left(\bar{c}_{p_{\text{с.в}}} + d\,\bar{c}_{p_{\text{п}}}\right)\left(\dfrac{T}{T_{\text{о.с}}} - 1 - \ln\dfrac{T}{T_{\text{о.с}}}\right) + \\ + R_{\text{п}}\left[(0{,}622 + d)\ln\dfrac{p(0{,}622 + d_{\text{о.с}})}{p_{\text{о.с}}(0{,}622 + d)} + d\ln\dfrac{d}{d_{\text{о.с}}}\right]\end{array}\right\}. \qquad (4.45)$$

Формула (4.45) может быть использована и для определения эксергии влажного насыщенного воздуха $e''_{\text{вл.в}}$. В этом случае $d = d_{\text{н}}$ и $T = T_{\text{н}}$

$$e''_{\text{вл.в}} = T_{\text{о.с}}\left\{\begin{array}{l}\left(\bar{c}_{p_{\text{с.в}}} + d_{\text{н}}\bar{c}_{p_{\text{н}}}\right)\left(\dfrac{T}{T_{\text{о.с}}} - 1 - \ln\dfrac{T}{T_{\text{о.с}}}\right) + \\ + R_{\text{п}}\left[(0{,}622 + d_{\text{н}})\ln\dfrac{p(0{,}622 + d_{\text{о.с}})}{p_{\text{о.с}}(0{,}622 + d_{\text{н}})} + d_{\text{н}}\ln\dfrac{d_{\text{н}}}{d_{\text{о.с}}}\right]\end{array}\right\}. \quad (4.46)$$

Примеры

Пример 4.8. Параметры воздуха в окружающей среде: $t_{\text{о.с}}$ = 15°С и $d_{\text{о.с}}$ = 0,006 кг вл/кг с.в. Определить эксергию влажного ненасыщенного воздуха, если его температура t = 25°С, а влагосодержание d = 0,01 кг вл/кг с.в. При расчёте принять $p_{\text{о.с}} = p$ = 100 кПа.

Используя формулу (4.45) и соответствующие значения для $\bar{c}_{p_{\text{с.в}}}$, $\bar{c}_{p_{\text{п}}}$ и $R_{\text{п}}$, получим

$$e_{\text{вл.в}} = 288{,}15\left\{\begin{array}{l}(1{,}006 + 0{,}01\cdot 1{,}86)\left(\dfrac{298{,}15}{288{,}15} - 1 - \ln\dfrac{298{,}15}{288{,}15}\right) + \\ + 0{,}4615\left[(0{,}622 + 0{,}01)\ln\dfrac{0{,}622 + 0{,}006}{0{,}622 + 0{,}01} + 0{,}01\cdot\ln\dfrac{0{,}01}{0{,}006}\right]\end{array}\right\} =$$

$$= 0{,}322\ \text{кДж/кг}.$$

Пример 4.9. Параметры воздуха в окружающей среде: $t_{\text{о.с}} = -25°\text{С}$, $\varphi_{\text{о.с}} = 80\%$. Определить эксергию влажного ненасыщенного воздуха при t = = 22°С и φ = 50%. Считать, что $p_{\text{о.с}} = p = 100$ кПа.

Определим влагосодержание воздуха в окружающей среде. При $t_{\text{о.с}} = -25°\text{С}$ давление насыщения водяного пара надо льдом можно определить по формуле (3.12)

$$p_{\text{н}}^{\text{о.с}} = 0{,}6112\exp\left[\frac{22{,}489(-25)}{272{,}88 + (-25)}\right] = 0{,}0633\ \text{кПа}.$$

Парциальное давление водяного пара

$$p_{\text{п}}^{\text{о.с}} = \varphi_{\text{о.с}}\, p_{\text{н}}^{\text{о.с}} = 0{,}8\cdot 0{,}0633 = 0{,}0506\ \text{кПа}.$$

Тогда влагосодержание воздуха в окружающей среде

$$d_{\text{о.с}} = 0{,}622\frac{0{,}0506}{100 - 0{,}0506} = 0{,}000315\ \text{кг вл/кг с.в}.$$

Аналогично определяем влагосодержание влажного ненасыщенного воздуха

$$p_{\text{н}} = 0{,}6112 \exp \frac{17{,}504 \cdot 22}{241{,}2 + 22} = 2{,}64 \text{ кПа}, \qquad p_{\text{п}} = 0{,}5 \cdot 2{,}64 = 1{,}32 \text{ кПа},$$

$$d = 0{,}622 \frac{1{,}32}{100 - 1{,}32} = 0{,}00832 \text{ кг вл/кг с.в.}$$

Используя формулу (4.45), найдём эксергию влажного ненасыщенного воздуха

$$e_{\text{вл.в}} = 248{,}15 \left\{ \begin{array}{l} (1{,}006 + 0{,}00832 \cdot 1{,}86) \left(\dfrac{295{,}15}{248{,}15} - 1 - \ln \dfrac{295{,}15}{248{,}15} \right) + \\ + 0{,}4615 \left[\begin{array}{l} (0{,}622 + 0{,}00832) \ln \dfrac{0{,}622 + 0{,}000315}{0{,}622 + 0{,}00832} + \\ + 0{,}00832 \ln \dfrac{0{,}00832}{0{,}000315} \end{array} \right] \end{array} \right\} = 6{,}254 \text{ кДж/кг}.$$

4.7.3. Эксергия воды

При определении эксергии воды или льда за точку отсчёта необходимо принимать состояние воды, равновесное с окружающей средой, т. е. присутствующий в атмосфере перегретый водяной пар, так как в большинстве реальных случаев влажный воздух в окружающей среде не насыщен, а, следовательно, вода или лёд неравновесны со средой [25]. В этом случае точка отсчёта совпадает с принятой точкой отсчёта при определении эксергии влажного воздуха.

Эксергия воды может быть определена по формуле

$$e_{\text{в}} = \Delta h_{\text{в}} - T_{\text{о.с}} \Delta s_{\text{в}}, \tag{4.47}$$

где $\Delta h_{\text{в}}$ и $\Delta s_{\text{в}}$ – разность энтальпий и энтропий между параметрами воды ($T_{\text{в}}$, $p_{\text{в}}$, $h_{\text{в}}$ и $s_{\text{в}}$) и перегретого водяного пара в атмосферном воздухе ($T_{\text{о.с}}$, $d_{\text{о,с}}$, $p_{\text{п}}^{\text{о.с}}$, $h_{\text{п}}^{\text{о.с}}$, $s_{\text{п}}^{\text{о.с}}$).

Энтальпия и энтропия являются функциями состояния, поэтому путь процессов перехода из одного состояния в другое может быть произвольным.

На рис. 4.4 в T–h-диаграмме показана последовательность процессов: фазовый переход *1–2* и нагрев водяного пара *2–3* до температуры окружающей среды при $T_{\text{о.с}} > T_{\text{в}}$ или охлаждение *2–3′* при $T_{\text{о.с}} < T_{\text{в}}$.

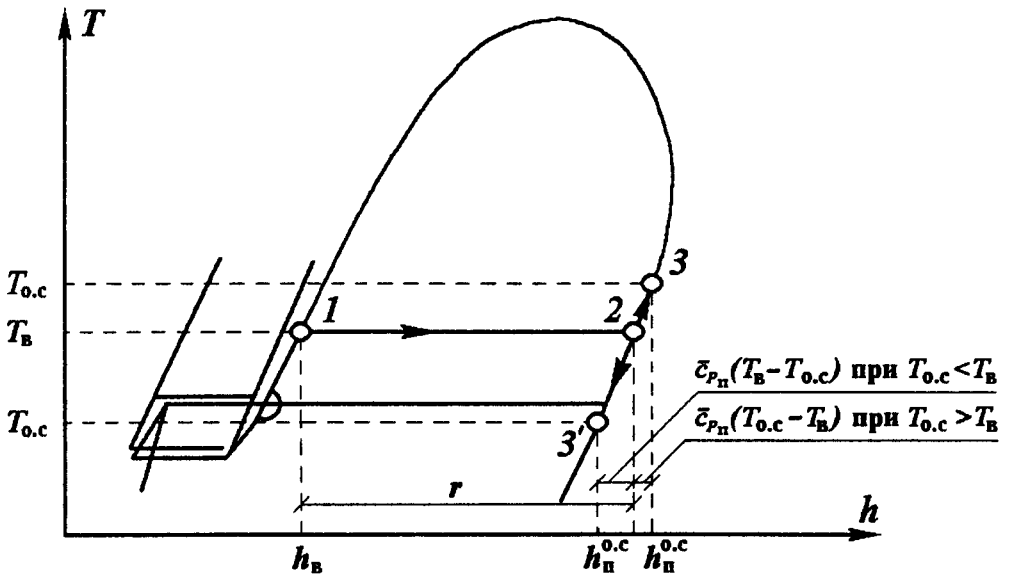


Рис. 4.4. Соотношение между энтальпиями перегретого водяного пара в окружающей среде $h_{\text{п}}^{\text{о.с}}$ и воды $h_{\text{в}}$

Так как энтальпия воды $h_{\text{в}} = \bar{c}_{p_{\text{в}}} T_{\text{в}}$, а энтальпия перегретого водяного пара при $T_{\text{о.с}} > T_{\text{в}}$

$$h_{\text{п}}^{\text{о.с}} = \bar{c}_{p_{\text{в}}} T_{\text{в}} + r + \bar{c}_{p_{\text{п}}}(T_{\text{о.с}} - T_{\text{в}}),$$

и при $T_{\text{о.с}} < T_{\text{в}}$

$$h_{\text{п}}^{\text{о.с}} = \bar{c}_{p_{\text{в}}} T_{\text{в}} + r - \bar{c}_{p_{\text{п}}}(T_{\text{в}} - T_{\text{о.с}}),$$

то для обоих случаев можно записать

$$\Delta h_{\text{в}} = h_{\text{в}} - h_{\text{п}}^{\text{о.с}} = \bar{c}_{p_{\text{п}}}(T_{\text{в}} - T_{\text{о.с}}) - r. \qquad (4.48)$$

Нахождение разности энтропий $\Delta S_{\text{в}}$ необходимо рассмотреть отдельно для вариантов $T_{\text{в}} > T_{\text{о.с}}$ и $T_{\text{в}} < T_{\text{о.с}}$.

На рис. 4.5 в T–s-диаграмме показана последовательность процессов при $T_в > T_{о.с}$: фазовый переход *1–2* (перепад энтропий $r/T_в$); изотермическое расширение *2–3* до парциального давления водяных паров в окружающей среде $p_п^{о.с}$ (перепад энтропий $R_п \ln \frac{p_{н_в}}{p_п^{о.с}}$); изобарное охлаждение *3–4* до температуры водяного пара в среде $T_{о.с}$ (перепад энтропий минус $\bar{c}_{p_п} \ln \frac{T_в}{T_{о.с}}$).

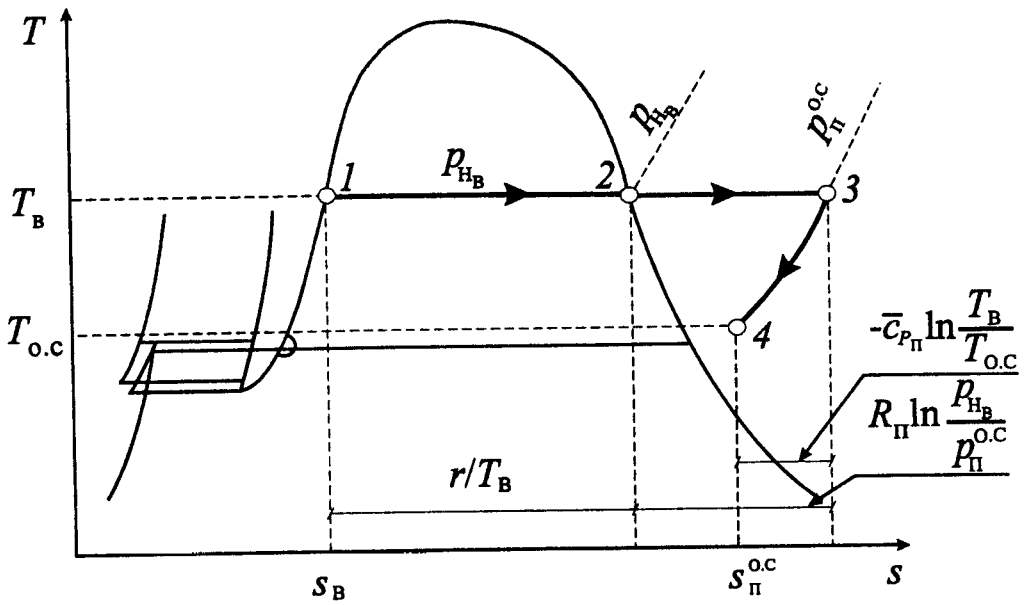


Рис. 4.5. Соотношение между энтропиями перегретого водяного пара в окружающей среде $s_п^{о.с}$ и воды $s_в$

Следовательно,

$$s_п^{о.с} = s_в + \frac{r}{T_в} + R_п \ln \frac{p_{н_в}}{p_п^{о.с}} - \bar{c}_{p_п} \ln \frac{T_в}{T_{о.с}}. \qquad (4.49)$$

Так как $\Delta s_в = s_в - s_п^{о.с}$, то

$$\Delta s_в = \bar{c}_{p_п} \ln \frac{T_в}{T_{о.с}} - R_п \ln \frac{p_{н_в}}{p_п^{о.с}} - \frac{r}{T_в}. \qquad (4.50)$$

Последовательность процессов при $T_в < T_{о.с}$ показана на рис. 4.6: фазовый переход *1–2* (перепад энтропий $r/T_в$); изобарный нагрев *2–3* до температуры $T_{о.с}$ (перепад энтропий $\bar{c}_{p_п} \ln \frac{T_{о.с}}{T_в}$); изотермический процесс до парциального давления водяного пара в окружающей среде $p_п^{о.с}$.

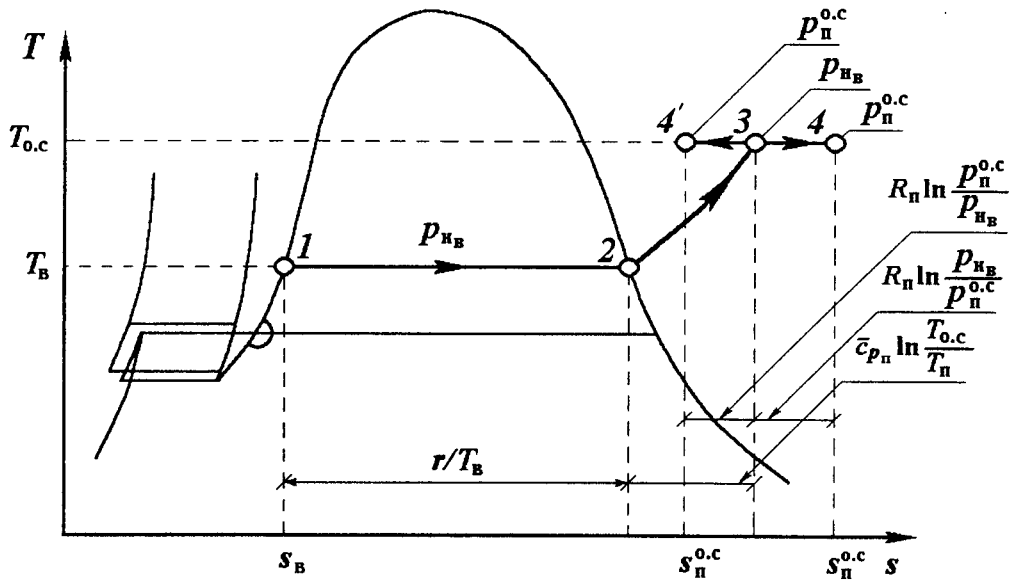


Рис. 4.6. Соотношение между энтропиями перегретого водяного пара в окружающей среде $s_п^{о.с}$ и воды $s_в$

Если $p_{н_в} > p_п^{о.с}$, то это процесс расширения *3–4* (перепад энтропий $R_п \ln \frac{p_{н_в}}{p_п^{о.с}}$); если $p_{н_в} < p_п^{о.с}$ – процесс сжатия *3–4′* (перепад энтропий $R_п \ln \frac{p_п^{о.с}}{p_{н_в}}$).

Таким образом, при $p_{н_в} > p_п^{о.с}$

$$s_п^{о.с} = s_в + \frac{r}{T_в} + \bar{c}_{p_п} \ln \frac{T_{о.с}}{T_в} + R_п \ln \frac{p_{н_в}}{p_п^{о.с}}. \qquad (4.51)$$

При $p_{\text{н}_\text{в}} < p_{\text{п}}^{\text{о.с}}$

$$s_{\text{п}}^{\text{о.с}} = s_{\text{в}} + \frac{r}{T_{\text{в}}} + \bar{c}\, p_{\text{п}} \ln \frac{T_{\text{о.с}}}{T_{\text{в}}} - R_{\text{п}} \ln \frac{p_{\text{п}}^{\text{о.с}}}{p_{\text{н}_\text{в}}}. \qquad (4.52)$$

Формулы (4.51) и (4.52) адекватны формуле (4.49), поэтому выражение (4.50) определяет перепад энтропий при любой температуре воды $T_{\text{в}}$ и окружающей среды $T_{\text{о.с}}$.

Таким образом, эксергия воды определяется по формуле

$$e_{\text{в}} = T_{\text{о.с}} \left[\bar{c}\, p_{\text{п}} \left(\frac{T_{\text{в}}}{T_{\text{о.с}}} - 1 - \ln \frac{T_{\text{в}}}{T_{\text{о.с}}} \right) + r \left(\frac{1}{T_{\text{в}}} - \frac{1}{T_{\text{о.с}}} \right) + R_{\text{п}} \ln \frac{p_{\text{н}_\text{в}}}{p_{\text{п}}^{\text{о.с}}} \right]. \qquad (4.53)$$

При выводе формулы (4.53) было сделано допущение, что изобары в области воды не отклоняются от линии кипения, т. е. не учитывается величина

$$e'_{\text{в}} = (h_{\text{в}} - h'_{\text{в}}) - T_{\text{о.с}} (s_{\text{в}} - s'_{\text{в}}), \qquad (4.54)$$

связанная с изменением энтальпии и энтропии при уменьшении давления воды до давления насыщенного водяного пара при той же температуре.

Значения $h_{\text{в}}$ начинают заметно отклоняться от значений $h'_{\text{в}}$ при давлениях, превышающих 230 кПа, а значения $s_{\text{в}}$ – от $s'_{\text{в}}$ при больших давлениях. Таким образом, если вода представляет собой взвешенные в воздухе мелкодисперсные капли с радиусом менее 1 мкм (см. табл. 3.14), то расчёт эксергии воды следует производить по формуле (4.47), прибавляя к ней величину $e'_{\text{в}}$.

Примеры

Пример 4.10. Определить эксергию воды при температуре $t_{\text{в}} = 5$°С, если температура окружающей среды $t_{\text{о.с}} = 40$°С, а влагосодержание

$$d_{\text{о.с}} = 0{,}008 \text{ кг вл/кг с.в } (p = 100 \text{ кПа}).$$

Парциальное давление насыщенного водяного пара при температуре воды $t_{\text{в}} = 5$°С определяем по формуле (3.12)

$$p_{\text{н}_\text{в}} = 0{,}6112 \exp\left(\frac{17{,}504 \cdot 5}{241{,}2 + 5} \right) = 0{,}872 \text{ кПа}.$$

Парциальное давление водяного пара в воздухе окружающей среды можно определить из выражения (4.13)

$$p_{\text{п}}^{\text{о.с}} = 110 \frac{0{,}008}{0{,}6221 + 0{,}008} = 1{,}397 \text{ кПа}.$$

Удельная теплота парообразования

$$r = 2500{,}64 - 2{,}369 \cdot 5 = 2488{,}79 \text{ кДж/кг}.$$

Эксергия воды, согласно (4.63),

$$e_{\text{в}} = 313{,}15\left[\begin{array}{l} 1{,}86\left(\dfrac{278{,}15}{313{,}15} - 1 - \ln\dfrac{278{,}15}{313{,}15}\right) + \\ + 2488{,}79\left(\dfrac{1}{278{,}15} - \dfrac{1}{313{,}15}\right) + 0{,}4615\ln\dfrac{0{,}872}{1{,}397}\end{array}\right] = 249{,}1 \text{ кДж/кг}.$$

4.7.4. Эксергия льда

Эксергия льда определяется по зависимости

$$e_{\text{л}} = \Delta h_{\text{л}} - T_{\text{о.с}}\Delta s_{\text{л}}, \qquad (4.55)$$

где $\Delta h_{\text{л}}$ и $\Delta s_{\text{л}}$ – разность энтальпий и энтропий между параметрами льда ($T_{\text{л}}$, $p_{\text{л}}$, $h_{\text{л}}$ и $s_{\text{л}}$) и параметрами водяного пара в окружающей среде ($T_{\text{о.с}}$, $P_{\text{о.с}}$, $d_{\text{о.с}}$, $h_{\text{п}}^{\text{о.с}}$ и $s_{\text{п}}^{\text{о.с}}$).

На рис. 4.7 в T–h-диаграмме показана последовательность процессов перехода из одного состояния в другое: фазовый переход – сублимация *1–2*, нагрев водяного пара до температуры окружающей среды *2–3* при $T_{\text{л}} < T_{\text{о.с}}$ или охлаждение водяного пара *2–3′* при $T_{\text{л}} > T_{\text{о.с}}$.

Энтальпия льда

$$h_{\text{л}} = \bar{c}_{p_{\text{л}}} T_{\text{л}} - r_{\text{пл}_0}.$$

Энтальпия перегретого водяного пара:

– при $T_{\text{о.с}} > T_{\text{л}}$

$$h_{\text{п}}^{\text{о.с}} = \bar{c}_{p_{\text{л}}} T_{\text{л}} - r_{\text{пл}_0} + r_{\text{суб}} + \bar{c}_{p_{\text{п}}}(T_{\text{о.с}} - T_{\text{л}}),$$

– при $T_{\text{о.с}} < T_{\text{л}}$

$$h_{\text{п}}^{\text{о.с}} = \bar{c}_{p_{\text{л}}} T_{\text{л}} - r_{\text{пл}_0} + r_{\text{суб}} - \bar{c}_{p_{\text{п}}}(T_{\text{л}} - T_{\text{о.с}}).$$

Поэтому для обоих случаев

$$\Delta h_{\text{л}} = h_{\text{л}} - h_{\text{п}}^{\text{о.с}} = \bar{c}_{p_{\text{п}}}(T_{\text{л}} - T_{\text{о.с}}) - r_{\text{суб}}. \qquad (4.56)$$

Для определения разности энтропий $\Delta s_{\text{л}}$ рассмотрим два варианта, когда $T_{\text{л}} > T_{\text{о.с}}$ и при $T_{\text{л}} < T_{\text{о.с}}$.

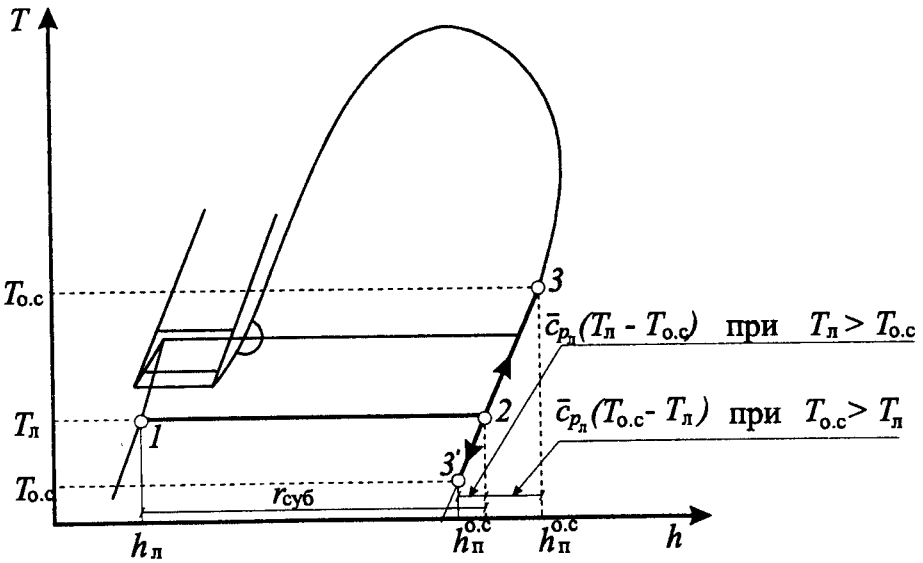


Рис. 4.7. Соотношение между энтальпиями перегретого водяного пара в окружающей среде $h_п^{о.с}$ и льда $h_л$

Последовательность процессов при $T_л > T_{о.с}$ представлена на T–s-диаграмме на рис. 4.8: фазовый переход – сублимация льда *1–2* (перепад энтропий $r_{суб}/T_л$); изотермическое расширение *2–3* до парциального давления водяных паров в атмосферном воздухе (перепад энтропий $R_п \ln \frac{p_{н_л}}{p_п^{о.с}}$); изобарное охлаждение *3–4* до температуры окружающей среды (перепад энтропий минус $\bar{c}_{p_п} \ln \frac{T_л}{T_{о.с}}$).

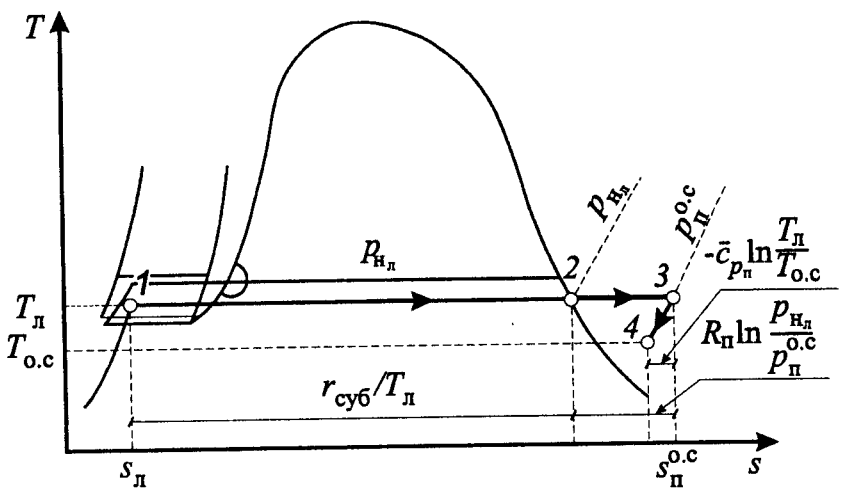


Рис. 4.8. Соотношение между энтропиями перегретого водяного пара в окружающей среде $h_п^{о.с}$ и льда $h_л$

При $T_л > T_{о.с}$

$$s_п^{о.с} = s_л + \frac{r_{суб}}{T_л} + R_п \ln \frac{p_{нл}}{p_п^{о.с}} - \bar{c}_{p_п} \ln \frac{T_л}{T_{о.с}}. \qquad (4.57)$$

Поэтому

$$\Delta s_л = s_л - s_п^{о.с} = \bar{c}_{p_п} \ln \frac{T_л}{T_{о.с}} - R_п \ln \frac{p_{нл}}{p_п^{о.с}} - \frac{r_{суб}}{T_л}. \qquad (4.58)$$

Последовательность процессов при $T_л < T_{о.с}$ представлена на рис. 4.9: сублимация льда *1–2* (перепад энтропий $r_{суб}/T_л$); изобарный нагрев *2–3* до температуры $T_{о.с}$ (перепад энтропий $\bar{c}_{p_п} \ln \frac{T_{о.с}}{T_л}$); изотермическое расширение *3–4*, если $p_{н_л} > p_п^{о.с}$ (перепад энтропий $R_п \ln \frac{p_{нл}}{p_п^{о.с}}$), или изотермическое сжатие *3–4′* при $p_{н_л} < p_п^{о.с}$ (перепад энтропий минус $R_п \ln \frac{p_п^{о.с}}{p_{нл}}$).

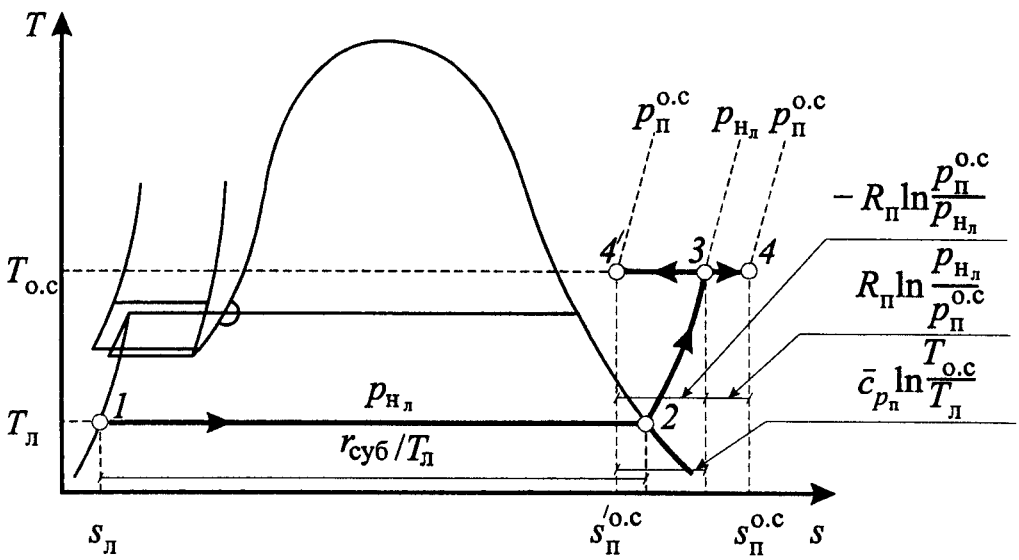


Рис. 4.9. Соотношение между энтропиями перегретого водяного пара в окружающей среде $h_п^{о.с}$ и льда $h_л$

С учётом изложенного будем иметь:

– при $p_{\text{нл}} < p_{\text{п}}^{\text{о.с}}$

$$s_{\text{п}}^{\text{о.с}} = s_{\text{л}} + \frac{r_{\text{суб}}}{T_{\text{л}}} + R_{\text{п}} \ln \frac{p_{\text{нл}}}{p_{\text{п}}^{\text{о.с}}} + \bar{c}\, p_{\text{п}} \ln \frac{T_{\text{о.с}}}{T_{\text{л}}}; \qquad (4.59)$$

– при $p_{\text{нл}} < p_{\text{п}}^{\text{о.с}}$

$$s_{\text{п}}^{\text{о.с}} = s_{\text{л}} + \frac{r_{\text{суб}}}{T_{\text{л}}} - R_{\text{п}} \ln \frac{p_{\text{п}}^{\text{о.с}}}{p_{\text{нл}}} + \bar{c}\, p_{\text{п}} \ln \frac{T_{\text{о.с}}}{T_{\text{л}}}. \qquad (4.60)$$

Формулы (4.59) и (4.60) адекватны выражению (4.57). Таким образом, перепад энтропий при любом соотношении температур льда и водяного пара может определяться по формуле (4.58).

Тогда эксергия льда с учётом (4.55)

$$e_{\text{л}} = T_{\text{о.с}} \left[\bar{c}\, p_{\text{п}} \left(\frac{T_{\text{л}}}{T_{\text{о.с}}} - 1 - \ln \frac{T_{\text{л}}}{T_{\text{о.с}}} \right) + r_{\text{суб}} \left(\frac{1}{T_{\text{л}}} - \frac{1}{T_{\text{о.с}}} \right) + R_{\text{п}} \ln \frac{p_{\text{нл}}}{p_{\text{п}}^{\text{о.с}}} \right]. \qquad (4.61)$$

4.7.5. Эксергия тумана

Для ***водяного тумана***

$$e_{\text{в.т}} = e''_{\text{вл.в}} + d_{\text{в}} e_{\text{в}}. \qquad (4.62)$$

Температура капельной влаги в водяном тумане равна температуре влажного воздуха, поэтому с учётом формул (4.46), (4.53) и (4.13) при $T_{\text{в}} = T$ после простых алгебраических преобразований

$$e_{\text{в.т}} = T_{\text{о.с}} \left\{ \begin{array}{l} \left[\bar{c}\, p_{\text{с.в}} + \bar{c}\, p_{\text{п}} (d_{\text{н}} + d_{\text{в}}) \right] \left(\dfrac{T}{T_{\text{о.с}}} - 1 - \ln \dfrac{T}{T_{\text{о.с}}} \right) + \\ \qquad + d_{\text{в}} r \left(\dfrac{1}{T} - \dfrac{1}{T_{\text{о.с}}} \right) + \\ + R_{\text{п}} \left[\begin{array}{l} (0{,}622 + d_{\text{н}} + d_{\text{в}}) \ln \dfrac{p(0{,}622 + d_{\text{о.с}})}{p_{\text{о.с}}(0{,}622 + d_{\text{н}})} + \\ + (d_{\text{н}} + d_{\text{в}}) \ln \dfrac{d_{\text{н}}}{d_{\text{о.с}}} \end{array} \right] \end{array} \right\}. \qquad (4.63)$$

Если водяной туман состоит из взвешенных в воздухе мелкодисперсных капель с радиусом менее 1 мкм, то эксергия рассчитывается по формуле

$$e_{\text{в.т}} = e''_{\text{вл.в}} + d_{\text{в}}\left(e_{\text{в}} + e'_{\text{в}}\right).$$

Эксергию ***ледяного тумана*** можно определить из выражения

$$e_{\text{л.т}} = e''_{\text{вл.в}} + d_{\text{л}} e_{\text{л}}. \qquad (4.64)$$

При $T_{\text{л}} = T$ и использовании формул (4.13), (4.46) и (4.61) получим

$$e_{\text{л.т}} = T_{\text{о.с}}\left\{\begin{array}{l}\left[\bar{c}\,p_{\text{с.в}} + \bar{c}\,p_{\text{п}}\left(d_{\text{н}} + d_{\text{л}}\right)\right]\left(\dfrac{T}{T_{\text{о.с}}} - 1 - \ln\dfrac{T}{T_{\text{о.с}}}\right) + \\ + d_{\text{л}} r_{\text{суб}}\left(\dfrac{1}{T} - \dfrac{1}{T_{\text{о.с}}}\right) + \\ + R_{\text{п}}\left[\begin{array}{l}\left(0{,}622 + d_{\text{н}} + d_{\text{л}}\right)\ln\dfrac{P\left(0{,}622 + d_{\text{о.с}}\right)}{P_{\text{о.с}}\left(0{,}622 + d_{\text{н}}\right)} + \\ + \left(d_{\text{н}} + d_{\text{л}}\right)\ln\dfrac{d_{\text{н}}}{d_{\text{о.с}}}\end{array}\right]\end{array}\right\}. \qquad (4.65)$$

Для определения эксергии ***смешанного тумана*** следует использовать соотношение

$$e_{\text{см.т}} = e''_{\text{вл.в}} + d_{\text{в}} e_{\text{в}} + d_{\text{л}} e_{\text{л}}. \qquad (4.66)$$

Так как при этом $T_{\text{в}} = T_{\text{л}} = T$, то используя соответствующие зависимости (4.13), (4.46), (4.53) и (4.61), после алгебраических преобразований получим

$$e_{\text{см.т}} = T_{\text{о.с}}\left\{\begin{array}{l}\left[\bar{c}\,p_{\text{с.в}} + \bar{c}\,p_{\text{п}}\left(d_{\text{н}} + d_{\text{в}} + d_{\text{л}}\right)\right]\left(\dfrac{T}{T_{\text{о.с}}} - 1 - \ln\dfrac{T}{T_{\text{о.с}}}\right) + \\ + \left(d_{\text{в}} r + d_{\text{л}} r_{\text{суб}}\right)\left(\dfrac{1}{T} - \dfrac{1}{T_{\text{о.с}}}\right) + \\ + R_{\text{п}}\left[\begin{array}{l}\left(0{,}622 + d_{\text{н}} + d_{\text{в}} + d_{\text{л}}\right)\ln\dfrac{p\left(0{,}622 + d_{\text{о.с}}\right)}{p_{\text{о.с}}\left(0{,}622 + d_{\text{н}}\right)} + \\ + \left(d_{\text{н}} + d_{\text{в}} + d_{\text{л}}\right)\ln\dfrac{d_{\text{н}}}{d_{\text{о.с}}}\end{array}\right]\end{array}\right\}. \quad (4.67)$$

Если состав смешанного тумана состоит из кристаллов льда и мелкодисперсных капель воды с радиусом менее 1 мкм, то эксергия определяется по формуле

$$e_{\text{см.т}} = e''_{\text{вл.в}} + d_{\text{в}}\left(e_{\text{в}} + e'_{\text{в}}\right) + d_{\text{л}} e_{\text{л}}.$$

4.8. Параметры влажного воздуха при изменении состава сухого воздуха

Все ранее рассмотренные вопросы касались термодинамики влажного воздуха при условии постоянства состава сухого воздуха. Однако могут быть такие условия обитания человека, например, в герметичном помещении, когда меняются количественные соотношения азота, кислорода и двуокиси углерода в сухом воздухе. В этом случае параметры состояния влажного воздуха не могут быть отнесены к 1 кг сухого воздуха как смеси идеальных газов определённого состава.

Для рассматриваемых условий целесообразно все параметры состояния влажного воздуха относить к 1 кг азота, масса которого в воздухе остаётся постоянной.

В этом случае ненасыщенный влажный воздух можно в первом приближении рассматривать как смесь азота N_2, кислорода O_2,

двуокиси углерода CO_2 и водяного пара H_2O. Для определения теплового состояния влажного воздуха при этом необходимо знать пять параметров: общее давление смеси p, температуру смеси T и парциальные давления водяного пара $p_п$, кислорода p_{O_2} и двуокиси углерода p_{CO_2}.

Тогда парциальное давление азота

$$p_{N_2} = p - \left(p_п + p_{O_2} + p_{CO_2}\right). \qquad (4.68)$$

Для определения состава смеси удобно использовать массу компонента, отнесённую к 1 кг азота:

– для водяного пара $$X_п = \frac{m_{в.п}}{m_{N_2}}; \qquad (4.69)$$

– для кислорода $$X_{O_2} = \frac{m_{O_2}}{m_{N_2}}; \qquad (4.70)$$

– для двуокиси углерода $$X_{CO_2} = \frac{m_{CO_2}}{m_{N_2}}. \qquad (4.71)$$

Используя уравнение состояния идеального газа, формулы (4.69) – (4.71) можно записать так:

$$X_п = \frac{p_п}{p_{N_2}} \frac{R_{N_2}}{R_п}; \qquad (4.72)$$

$$X_{O_2} = \frac{p_{O_2}}{p_{N_2}} \frac{R_{N_2}}{R_{O_2}}; \qquad X_{CO_2} = \frac{p_{CO_2}}{p_{N_2}} \frac{R_{N_2}}{R_{CO_2}}.$$

Выражение (4.72) представляет собой массовое влагосодержание ненасыщенного влажного воздуха, т. е. массу водяного пара в килограммах, отнесённую к 1 кг азота. С учётом численных значений для R_{N_2} и $R_п$ формула для определения влагосодержания примет вид

$$X_п = 0{,}643 \frac{p_п}{p - \left(p_п + p_{O_2} + p_{CO_2}\right)}. \qquad (4.73)$$

Для X_{O_2} и X_{CO_2}

$$X_{O_2} = 0{,}875 \frac{p_{O_2}}{p - \left(p_п + p_{O_2} + p_{CO_2}\right)};$$

$$X_{CO_2} = 0{,}636\frac{p_{CO_2}}{p-\left(p_п + p_{O_2} + p_{CO_2}\right)}.$$

Относительная влажность воздуха определяется аналогично формуле (4.7), поэтому формулу (4.73) можно записать в следующем виде:

$$X_п = 0{,}643\frac{\varphi p_н}{p-\left(\varphi p_п + p_{O_2} + p_{CO_2}\right)}.$$

Для насыщенного влажного воздуха

$$X_н = 0{,}643\frac{p_н}{p-\left(p_п + p_{O_2} + p_{CO_2}\right)},$$

откуда степень насыщения влажного воздуха

$$\psi = \frac{X_п}{X_н} = \varphi\frac{p-\left(p_н + p_{O_2} + p_{CO_2}\right)}{p-\left(p_п + p_{O_2} + p_{CO_2}\right)}.$$

Удельная энтальпия влажного ненасыщенного воздуха

$$h_{вл.в} = \left(\bar{c}\,p_{N_2} + X_{O_2}\bar{c}\,p_{O_2} + X_{CO_2}\bar{c}\,p_{CO_2}\right)t + X_п\left(r_0 + \bar{c}\,p_п t\right).$$

Приложение

Таблица 1

Физические свойства сухого атмосферного воздуха при p = 101,3 кПа [1]

t,°C	ρ, кг/м^3	c_p, кДж/(кг·К)	$\lambda\cdot10^2$ Вт/(м·К)	$a\cdot10^6$, м^2/с	$\mu\cdot10^6$, Па·с	$\nu\cdot10^6$, м^2/с	Pr
–50	1,584	1,013	2,04	12,7	14,6	9,23	0,728
–40	1,515	1,013	2,12	13,8	15,2	10,04	0,728
–30	1,453	1,013	2,20	14,9	15,7	10,80	0,723
–20	1,395	1,009	2,28	16,2	16,2	12,79	0,716
–10	1,342	1,009	2,36	17,4	16,7	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,0	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	25,7	19,6	17,95	0,698

Таблица 2

Коэффициент поверхностного натяжения воды, изобарная теплоёмкость, коэффициенты теплопроводности и диинамической вязкости, число Прандтля воды и водяного пара в состоянии насыщения [1, 11]

		Вода									
t, °C	p'', кПа	ρ, кг/м^3	c_p, кДж/(кг·К)	$\lambda\cdot10^3$, Вт/(м·К)	$\mu\cdot10^6$, Па·с	Pr	$\sigma\cdot10^3$, Н/м	$a\cdot10^6$, м^2/с	$\nu\cdot10^6$, м^2/с	$\beta\cdot10^4$, К$^{-1}$
0	0,61	999,9	4,217	569	1752,5	12,99	75,5	13,1	1,789	– 0,63
10	1,23	999,7	4,193	586	1299,2	9,30	74,4	13,7	1,306	0,70
20	2,34	998,2	4,182	602	1001,5	6,96	72,9	14,3	1,006	1,82
30	4,24	995,7	4,179	617	797,0	5,40	71,2	14,9	0,805	3,21
40	7,37	992,2	4,179	630	651,3	4,32	69,5	15,3	0,659	3,87
50	12,33	988,1	4,181	643	544,0	3,54	67,8	15,7	0,556	4,49
60	19,92	983,1	4,185	653	463,0	2,97	66,1	16,0	0,478	5,11
70	31,17	977,8	4,190	662	400,5	2,54	64,4	16,3	0,415	5,70
80	47,36	971,8	4,197	669	351,0	2,20	62,7	16,6	0,365	6,32
90	70,11	965,3	4,205	675	311,3	1,94	60,9	16,8	0,326	6,95
100	101,3	958,4	4,216	680	279,0	1,73	59,0	16,9	0,295	7,52

		Пар						
t, °C	p'', кПа	ρ, кг/м^3	c_p, кДж/(кг·К)	$\lambda\cdot10^3$, Вт/(м·К)	$\mu\cdot10^6$, Па·с	Pr	$a\cdot10^6$, м^2/с	$\nu\cdot10^6$, м^2/с
0	0,61	0,0048	1,864	17,6	8,04	0,85	1967,1	1675,0
10	1,23	0,0094	1,868	18,2	8,45	0,87	1036,5	898,94
20	2,34	0,0173	1,874	18,8	8,85	0,88	579,88	511,56
30	4,24	0,0304	1,883	10,4	9,26	0,90	338,90	304,60
40	7,37	0,0509	1,894	20,1	9,66	0,91	208,49	189,78
50	12,33	0,0831	1,907	20,9	10,0	0,92	131,88	120,34
60	19,92	0,1302	1,924	21,6	10,5	0,94	86,22	80,64
70	31,17	0,1982	1,944	22,3	10,9	0,95	57,88	54,99
80	47,36	0,2934	1,969	23,1	11,3	0,96	39,98	38,51
90	70,11	0,4235	1,999	23,9	11,7	0,98	–	27,63
100	101,3	0,598	2,034	24,8	12,1	0,99	18,58	20,02

Таблица 3

Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по температурам) [11]

t, °C	T, К	p, кПа	$v' \cdot 10^3$, $\frac{м^3}{кг}$	v'', $\frac{м^3}{кг}$	h', $\frac{кДж}{кг}$	h'', $\frac{кДж}{кг}$	r, $\frac{кДж}{кг}$	s', $\frac{кДж}{(кг \cdot К)}$	s'', $\frac{кДж}{(кг \cdot К)}$	$s''-s'$, $\frac{кДж}{(кг \cdot К)}$
0,00	273,15	0,6108	1,0002	206,321	–0,04	2501,0	2501,0	–0,0002	9,1565	9,1567
0,01	283,16	0,6112	1,00022	206,175	0,000614	2501,0	2501,0	0,0000	9,1562	9,1562
1,0	274,15	0,6566	1,0001	192,611	4,17	2502,8	2498,6	0,0152	9,1298	9,1146
2,0	275,15	0,7054	1,0001	179,935	8,39	2504,7	2496,3	0,0306	9,1035	9,0729
3,0	276,15	0,7575	1,0000	168,165	12,60	2506,5	2493,9	0,0459	9,0773	9,0314
4,0	277,15	0,8129	1,0000	157,267	16,80	2508,3	2491,5	0,0611	9,0514	8,9903
5,0	278,15	0,8718	1,0000	147,167	21,01	2510,2	2489,2	0,0762	9,0258	8,9496
6,0	279,15	0,9346	1,0000	137,768	25,21	2512,0	2486,8	0,0913	9,0003	8,9090
7,0	280,15	1,0012	1,0001	129,061	29,41	2513,9	2484,5	0,1063	8,9751	8,8688
8,0	281,15	1,0721	1,0001	120,952	33,60	2515,7	2482,1	0,1213	8,9501	8,8288
9,0	282,15	1,1473	1,0002	113,423	37,80	2517,5	2479,7	0,1362	8,9254	8,7892
10,0	283,15	1,2271	1,0003	106,419	41,99	2519,4	2477,4	0,1510	8,9009	8,7499
11,0	284,15	1,3118	1,0003	99,896	46,19	2521,2	2475,0	0,1658	8,8766	8,7108
12,0	285,15	1,4015	1,0004	93,828	50,38	2523,0	2472,6	0,1805	8,8525	8,6720
13,0	286,15	1,4967	1,0006	88,165	54,57	2524,9	2470,2	0,1952	8,8286	8,6334
14,0	287,15	1,5974	1,0007	82,893	58,75	2526,7	2467,9	0,2098	8,8050	8,5952
15,0	288,15	1,7041	1,0008	77,970	62,94	2528,6	2465,7	0,2243	8,7815	8,5572
15,5	288,65	1,7598	1,0009	75,632	65,03	2529,5	2464,5	0,2316	8,7699	8,5383
16,0	289,15	1,8170	1,0010	73,376	67,13	2530,4	2463,3	0,2388	8,7583	8,5195
16,5	289,65	1,8759	1,0011	71,194	69,22	2531,3	2462,1	0,2460	8,7468	8,5008
17,0	290,15	1,9364	1,0012	69,087	71,31	2532,2	2460,9	0,2533	8,7353	8,4820
17,5	290,65	1,9986	1,0012	67,051	73,40	2533,1	2459,7	0,2605	8,7239	8,4634
18,0	291,15	2,0626	1,0013	65,080	75,50	2534,0	2458,5	0,2677	8,7125	8,4448
18,5	291,65	2,1284	1,0014	63,175	77,59	2535,0	2457,4	0,2748	8,7011	8,4263
19,0	292,15	2,1960	1,0015	61,334	79,68	2535,9	2456,2	0,2820	8,6898	8,4078
19,5	292,65	2,2654	1,0016	59,556	81,77	2536,8	2455,0	0,2892	8,6786	8,3894
20,0	293,15	2,3368	1,0017	57,833	83,86	2537,7	2453,8	0,2963	8,6674	8,3711
20,5	293,65	2,4102	1,0018	56,166	85,95	2538,6	2452,6	0,3034	8,6563	8,3529
21,0	294,15	2,4855	1,0019	54,556	88,04	2539,5	2451,5	0,3105	8,6452	8,3347
21,5	294,65	2,5629	1,0020	52,997	90,13	2540,4	2450,3	0,3176	8,6342	8,3166
22,0	295,15	2,6424	1,0022	51,488	92,22	2541,4	2449,2	0,3247	8,6232	8,2985
22,5	295,65	2,7241	1,0023	50,027	94,32	2542,3	2448,0	0,3318	8,6123	8,2805
23,0	296,15	2,8079	1,0024	48,615	96,41	2543,2	2446,8	0,3389	8,6014	8,2625
23,5	296,65	2,8940	1,0025	47,247	98,50	2544,1	2445,6	0,3459	8,5905	8,2446
24,0	297,15	2,9824	1,0026	45,923	100,59	2545,0	2444,4	0,3530	8,5797	8,2267

Продолжение табл. 3

t, °C	T, К	p, кПа	$v' \cdot 10^3$, $\frac{м^3}{кг}$	v'', $\frac{м^3}{кг}$	h', $\frac{кДж}{кг}$	h'', $\frac{кДж}{кг}$	r, $\frac{кДж}{кг}$	s', $\frac{кДж}{(кг \cdot К)}$	s'', $\frac{кДж}{(кг \cdot К)}$	$s''-s'$, $\frac{кДж}{(кг \cdot К)}$
24,5	297,65	3,0731	1,0028	44,641	102,68	2545,9	2443,2	0,3600	8,5690	8,2090
25,0	298,15	3,1663	1,0029	43,399	104,77	2546,8	2442,0	0,3670	8,5583	8,1913
25,5	298,65	3,2619	1,0030	42,196	106,86	2547,7	2440,8	0,3740	8,5476	8,1736
26,0	299,15	3,3600	1,0032	41,031	108,95	2548,6	2439,6	0,3810	8,5370	8,1560
26,5	299,65	3,4606	1,0033	39,904	111,64	2549,5	2438,5	0,3880	8,5264	8,1384
27,0	300,15	3,5639	1,0034	38,811	113,13	2550,4	2437,3	0,3949	8,5159	8,1210
27,5	300,65	3,6698	1,0036	37,752	115,22	2551,4	2436,2	0,4019	8,5054	8,1035
28,0	301,15	3,7785	1,0037	36,726	117,31	2552,3	2435,0	0,4088	8,4950	8,0862
28,5	301,65	3,8900	1,0039	35,732	119,40	2553,2	2433,8	0,4158	8,4846	8,0688
29,0	302,15	4,0043	1,0040	34,768	121,48	2554,1	2432,6	0,4227	8,4743	8,0516
29,5	302,65	4,1215	1,0042	33,834	123,57	2555,0	2431,4	0,4296	8,4640	8,0344
30,0	303,15	4,2417	1,0043	32,929	125,66	2555,9	2430,2	0,4365	8,4537	8,0172
30,5	303,65	4,3650	1,0045	32,050	127,75	2556,8	2429,0	0,4434	8,4435	8,0001
31,0	304,15	4,4913	1,0046	31,199	129,84	2557,7	2427,9	0,4503	8,4334	7,9831
31,5	304,65	4,6208	1,0048	30,373	131,93	2558,6	2426,7	0,4571	8,4233	7,9662
32,0	305,15	4,7536	1,0049	29,572	134,02	2559,5	2425,5	0,4640	8,4132	7,9492
32,5	305,65	4,8896	1,0051	28,796	136,11	2560,4	2424,3	0,4708	8,4031	7,9323
33,0	306,15	5,0290	1,0053	28,042	138,20	2561,4	2423,2	0,4777	8,3932	7,9155
33,5	306,65	5,1718	1,0054	27,312	140,29	2562,3	2422,0	0,4845	8,3832	7,8987
34,0	307,15	5,3182	1,0056	26,602	142,38	2563,2	2420,8	0,4913	8,3733	7,8820
34,5	307,65	5,4681	1,0058	25,914	144,47	2564,1	2419,6	0,4981	8,3634	7,8653
35,0	308,15	5,6217	1,0060	25,246	146,56	2565,0	2418,4	0,5049	8,3536	7,8487
36,0	309,15	5,9401	1,0063	23,968	150,74	2566,8	2416,1	0,5184	8,3341	7,8157
37,0	310,15	6,2740	1,0067	22,764	154,92	2568,6	2413,7	0,5319	8,3147	7,7828
38,0	311,15	6,6240	1,0070	21,629	159,09	2570,4	2411,3	0,5453	8,2955	7,7502
39,0	312,15	6,9907	1,0074	20,558	163,27	2572,2	2408,9	0,5588	8,2765	7,7177
40	313,15	7,3749	1,0078	19,548	167,45	2574,0	2406,5	0,5721	8,2576	7,6855
41	314,15	7,7772	1,0082	18,594	171,63	2575,8	2404,2	0,5854	8,2389	7,6535
42	315,15	8,1983	1,0086	17,694	175,81	2577,6	2401,8	0,5987	8,2203	7,6216
43	316,15	8,6390	1,0090	16,843	179,99	2579,4	2399,4	0,6120	8,2019	7,5899
44	317,15	9,0998	1,0094	16,039	184,17	2581,1	2396,9	0,6252	8,1836	7,5584
45	318,15	9,5817	1,0099	15,278	188,35	2582,9	2394,5	0,6383	8,1655	7,5272
46	319,15	10,0854	1,0103	14,559	192,53	2584,7	2392,2	0,6514	8,1475	7,4961
47	320,15	10,612	1,0107	13,879	196,71	2586,5	2389,8	0,6645	8,1297	7,4652
48	321,15	11,161	1,0112	13,236	200,89	2588,3	2387,4	0,6776	8,1121	7,4345
49	322,15	11,735	1,0116	12,626	205,07	2590,1	2385,0	0,6906	8,0945	7,4039

Продолжение табл. 3

t, °C	T, К	p, кПа	$v' \cdot 10^3$, $\frac{м^3}{кг}$	v'', $\frac{м^3}{кг}$	h', $\frac{кДж}{кг}$	h'', $\frac{кДж}{кг}$	r, $\frac{кДж}{кг}$	s', $\frac{кДж}{(кг \cdot К)}$	s'', $\frac{кДж}{(кг \cdot К)}$	$s''-s'$, $\frac{кДж}{(кг \cdot К)}$
50	323,15	12,335	1,0121	12,048	209,26	2591,8	2382,5	0,7035	8,0771	7,3736
51	324,15	12,960	1,0126	11,501	213,44	2593,6	2380,2	0,7164	8,0598	7,3434
52	325,15	13,612	1,0131	10,982	217,62	2595,4	2377,8	0,7293	8,0427	7,3133
53	326,15	14,292	1,0136	10,490	221,80	2597,2	2375,4	0,7422	8,0258	7,2836
54	327,15	15,001	1,0140	10,024	225,98	2598,9	2372,9	0,7550	8,0089	7,2539
55	328,15	15,740	1,0145	9,5812	230,17	2600,7	2370,5	0,7677	7,9922	7,2245
56	329,15	16,510	1,0150	9,1609	234,35	2602,4	2368,1	0,7804	7,9756	7,1952
57	330,15	17,312	1,0156	8,7618	238,54	2604,2	2365,7	0,7931	7,9591	7,1660
58	331,15	18,146	1,0161	8,3831	242,72	2606,0	2363,3	0,8058	7,9428	7,1370
59	332,15	19,015	1,0166	8,0229	246,91	2607,7	2360,8	0,8184	7,9266	7,1082
60	333,15	19,919	1,0171	7,6807	251,09	2609,5	2358,4	0,8310	7,9106	7,0796
61	334,15	20,859	1,0177	7,3554	255,28	2611,2	2355,9	0,8435	7,8946	7,0511
62	335,15	21,837	1,0182	7,0458	259,46	2613,0	2353,5	0,8560	7,8788	7,0228
63	336,15	22,854	1,0188	6,7512	263,65	2614,7	2351,1	0,8685	7,8631	6,9946
64	337,15	23,910	1,0193	6,4711	267,84	2616,4	2348,6	0,8809	7,8475	6,9666
65	338,15	25,008	1,0199	6,2042	272,02	2618,2	2346,2	0,8933	7,8320	6,9387
66	339,15	26,148	1,0205	5,9502	276,21	2619,9	2343,7	0,9057	7,8167	6,9110
67	340,15	27,332	1,0211	5,7082	280,40	2621,6	2341,2	0,9180	7,8015	6,8835
68	341,15	28,561	1,0217	5,4775	284,59	2623,3	2338,7	0,9303	7,7864	6,8561
69	342,15	29,837	1,0222	5,2576	288,78	2625,1	2336,3	0,9426	7,7714	6,8288
70	343,15	31,161	1,0228	5,0479	292,97	2626,8	2333,8	0,9548	7,7565	6,8017
71	344,15	32,533	1,0235	4,8481	297,16	2628,5	2331,3	0,9670	7,7417	6,7747
72	345,15	33,957	1,0241	4,6574	301,36	2630,2	2328,8	0,9792	7,7270	6,7478
73	346,15	35,433	1,0247	4,4753	305,55	2631,9	2326,3	0,9913	7,7125	6,7212
74	347,15	36,963	1,0253	4,3015	309,74	2633,6	2323,9	1,0034	7,6980	6,6946
75	348,15	38,548	1,0259	4,1356	313,94	2635,3	2321,4	1,0154	7,6837	6,6683
76	349,15	40,190	1,0266	3,9771	318,13	2637,0	2318,9	1,0275	7,6694	6,6419
77	350,15	41,890	1,0272	3,8257	322,33	2638,7	2316,4	1,0395	7,6553	6,6158
78	351,15	43,650	1,0279	3,6811	326,52	2640,4	2313,9	1,0514	7,6413	6,5899
79	352,15	45,473	1,0235	3,5427	330,72	2642,1	2311,4	1,0634	7,6274	6,5640
80	353,15	47,359	1,0292	3,4104	334,92	2643,8	2308,9	1,0752	7,6135	6,5383
81	354,15	49,310	1,0299	3,2839	339,11	2645,4	2306,3	1,0871	7,5998	6,5127
82	355,15	51,328	1,0305	3,1629	343,31	2647,1	2303,8	1,0990	7,5862	6,4872
83	356,15	53,415	1,0312	3,0471	347,51	2648,8	2301,3	1,1108	7,5726	6,4618
84	357,15	55,572	1,0319	2,9362	351,71	2650,4	2298,7	1,1225	7,5592	6,4367

Окончание табл. 3

t, °C	T, К	p, кПа	$v' \cdot 10^3$, $\frac{м^3}{кг}$	v'', $\frac{м^3}{кг}$	h', $\frac{кДж}{кг}$	h'', $\frac{кДж}{кг}$	r, $\frac{кДж}{кг}$	s', $\frac{кДж}{(кг \cdot К)}$	s'', $\frac{кДж}{(кг \cdot К)}$	$s'' - s'$, $\frac{кДж}{(кг \cdot К)}$
85	358,15	57,803	1,0326	2,8300	355,92	2652,1	2296,2	1,1343	7,5459	6,4116
86	359,15	60,107	1,0333	2,7284	360,12	2653,7	2293,6	1,1460	7,5326	6,3866
87	360,15	62,488	1,0340	2,6309	364,32	2655,4	2291,1	1,1577	7,5195	6,3618
88	361,15	64,947	1,0347	2,5376	368,53	2657,0	2288,5	1,1693	7,5064	6,3371
89	362,15	67,486	1,0354	2,4482	372,73	2658,7	2286,0	1,1809	7,4934	6,3125
90	363,15	70,108	1,0361	2,3624	376,94	2660,3	2283,4	1,1925	7,4805	6,2880
91	364,15	72,814	1,0369	2,2801	381,15	2661,9	2280,7	1,2041	7,4677	6,2636
92	365,15	75,607	1,0376	2,2012	385,36	2663,5	2278,1	1,2156	7,4550	6,2394
93	366,15	78,488	1,0384	2,1256	389,57	2665,2	2275,6	1,2271	7,4424	6,2153
94	367,15	81,460	1,0391	2,0529	393,78	2666,8	2273,0	1,2386	7,4299	6,1913
95	368,15	84,525	1,0398	1,9832	397,99	2668,4	2270,4	1,2500	7,4174	6,1674
96	369,15	87,685	1,0406	1,9163	402,20	2670,0	2267,8	1,2615	7,4051	6,1436
97	370,15	90,943	1,0414	1,8520	406,42	2671,6	2265,2	1,2729	7,3928	6,1199
98	371,15	94,301	1,0421	1,7902	410,63	2673,2	2262,6	1,2842	7,3806	6,0964
99	372,15	97,760	1,0429	1,7309	414,85	2674,8	2259,9	1,2956	7,3685	6,0729
100	373,15	101,325	1,0437	1,6738	419,06	2676,3	2257,2	1,3069	7,3564	6,0495

Таблица 4

Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по давлениям) [11]

p, кПа	t, °C	$v' \cdot 10^3$, $\frac{м^3}{кг}$	v'', $\frac{м^3}{кг}$	h', $\frac{кДж}{кг}$	h'', $\frac{кДж}{кг}$	r, $\frac{кДж}{кг}$	s', $\frac{кДж}{(кг \cdot К)}$	s'', $\frac{кДж}{(кг \cdot К)}$	$s'' - s'$, $\frac{кДж}{(кг \cdot К)}$
1,00	6,982	1,0001	129,208	29,33	2513,8	2484,5	0,1060	8,9756	8,8696
1,50	13,034	1,0006	87,982	54,71	2525,0	2470,3	0,1956	8,8278	8,6322
2,00	17,511	1,0012	67,006	73,45	2533,2	2459,8	0,2606	8,7236	8,4630
2,20	19,029	1,0015	61,229	79,80	2535,9	2456,1	0,2824	8,6892	8,4068
2,40	20,431	1,0018	56,392	85,67	2538,5	2452,8	0,3024	8,6578	8,3554
2,50	21,094	1,0020	54,256	88,44	2539,7	2451,3	0,3119	8,6431	8,3312
2,60	21,735	1,0021	52,282	91,12	2540,9	2449,8	0,3210	8,6290	8,3080
2,80	22,953	1,0024	48,745	96,21	2543,1	2446,9	0,3382	8,6024	8,2642
3,00	24,098	1,0027	45,668	101,00	2545,2	2444,2	0,3543	8,5776	8,2233
3,20	25,178	1,0029	42,967	105,51	2547,2	2441,7	0,3695	8,5545	8,1850

Продолжение табл. 4

p, кПа	t, °С	$v' \cdot 10^3$, $\frac{м^3}{кг}$	v'', $\frac{м^3}{кг}$	h', $\frac{кДж}{кг}$	h'', $\frac{кДж}{кг}$	r, $\frac{кДж}{кг}$	s', $\frac{кДж}{(кг \cdot К)}$	s'', $\frac{кДж}{(кг \cdot К)}$	$s''-s'$, $\frac{кДж}{(кг \cdot К)}$
3,40	26,200	1,0032	40,575	109,78	2549,0	2439,2	0,3838	8,5327	8,1489
3,50	26,692	1,0033	39,480	111,84	2549,9	2438,1	0,3907	8,5224	8,1317
3,60	27,172	1,0035	38,443	113,84	2550,8	2437,0	0,3973	8,5123	8,1150
3,80	28,097	1,0037	36,530	117,71	2552,5	2434,8	0,4102	8,4930	8,0828
4,00	28,981	1,0040	34,803	121,41	2554,1	2432,7	0,4224	8,4747	8,0523
4,20	29,828	1,0043	33,237	124,94	2555,6	2430,7	0,4341	8,4573	8,0232
4,40	30,640	1,0045	31,810	128,34	2557,1	2428,8	0,4453	8,4407	7,9954
4,50	31,034	1,0046	31,142	129,98	2557,8	2427,8	0,4507	8,4327	7,9820
4,60	31,420	1,0048	30,503	131,60	2558,5	2426,9	0,4560	8,4249	7,9689
4,80	32,172	1,0050	29,303	134,74	2559,9	2425,2	0,4663	8,4097	7,9434
5,0	32,90	1,0052	28,196	137,77	2561,2	2423,4	0,4762	8,3952	7,9190
5,2	33,60	1,0055	27,172	140,70	2562,4	2421,7	0,4858	8,3813	7,8955
5,4	34,27	1,0057	26,222	143,52	2563,6	2420,1	0,4950	8,3678	7,8728
5,5	34,60	1,0058	25,772	144,91	2564,2	2419,3	0,4995	8,3613	7,8618
5,6	34,93	1,0059	25,338	146,27	2564,8	2418,5	0,5039	8,3550	7,8511
5,8	35,57	1,0062	24,514	148,92	2566,0	2417,1	0,5125	8,3426	7,8301
6,0	36,18	1,0064	23,742	151,50	2567,1	2415,6	0,5209	8,3305	7,8096
6,2	36,78	1,0066	23,020	154,01	2568,2	2414,2	0,5290	8,3189	7,7899
6,4	37,37	1,0068	22,342	156,44	2569,2	2412,8	0,5368	8,3077	7,7709
6,5	37,65	1,0069	22,017	157,64	2569,7	2412,1	0,5401	8,3022	7,7615
6,6	37,93	1,0070	21,703	158,81	2570,3	2411,5	0,5444	8,2968	7,7524
6,8	38,49	1,0072	21,101	161,12	2571,3	2410,2	0,5519	8,2863	7,7344
7,0	39,02	1,0074	20,532	163,38	2572,2	2408,8	0,5591	8,2760	7,7169
7,5	40,32	1,0079	19,241	168,77	2574,5	2405,7	0,5763	8,2517	7,6754
8,0	41,53	1,0084	18,106	173,87	2576,7	2402,8	0,5926	8,2289	7,6363
8,5	42,69	1,0089	17,102	178,69	2578,8	2400,1	0,6079	8,2076	7,5997
9,0	43,79	1,0094	16,206	183,28	2580,8	2397,5	0,6224	8,1875	7,5651
9,5	44,83	1,0098	15,402	187,66	2582,6	2394,9	0,6361	8,1685	7,5324
10,0	45,83	1,0102	14,676	191,84	2584,4	2392,6	0,6493	8,1505	7,5012
11,0	47,71	1,0111	13,418	199,68	2587,8	2388,1	0,6738	8,1171	7,4433
12,0	49,45	1,0119	12,364	206,94	2590,9	2384,0	0,6963	8,0867	7,3904
13,0	51,06	1,0126	11,467	213,70	2593,7	2380,0	0,7172	8,0588	7,3416
14,0	52,58	1,0133	10,696	220,03	2596,4	2376,4	0,7367	8,0330	7,2963
15,0	54,00	1,0140	10,025	225,98	2598,9	2372,9	0,7549	8,0089	7,2540
16,0	55,34	1,0147	9,4348	231,60	2601,3	2369,7	0,7721	7,9865	7,2144

Окончание табл. 4

p, кПа	t, °С	$v' \cdot 10^3$, $\frac{м^3}{кг}$	v'', $\frac{м^3}{кг}$	h', $\frac{кДж}{кг}$	h'', $\frac{кДж}{кг}$	r, $\frac{кДж}{кг}$	s', $\frac{кДж}{(кг \cdot К)}$	s'', $\frac{кДж}{(кг \cdot К)}$	$s''-s'$, $\frac{кДж}{(кг \cdot К)}$
17,0	56,62	1,0154	8,9128	236,93	2603,5	2366,6	0,7883	7,9655	7,1772
18,0	57,83	1,0160	8,4470	242,00	2605,7	2363,7	0,8036	7,9456	7,1420
19,0	58,98	1,0166	8,0288	246,83	2607,7	2360,9	0,8182	7,9269	7,1087
20,0	60,09	1,0172	7,6515	251,46	2609,6	2358,1	0,8321	7,9092	7,0771
21,0	61,15	1,0178	7,3091	255,89	2611,5	2355,6	0,8454	7,8923	7,0469
22,0	62,16	1,0183	6,9967	260,14	2613,2	2353,1	0,8581	7,8762	7,0181
23,0	63,14	1,0189	6,7110	264,24	2614,9	2350,7	0,8703	7,8609	6,9906
24,0	64,08	1,0194	6,4483	268,18	2616,6	2348,4	0,8820	7,8462	6,9642
25,0	64,99	1,0199	6,2060	271,99	2618,1	2346,1	0,8932	7,8321	6,9389
26,0	65,87	1,0204	5,9819	275,68	2619,7	2344,0	0,9041	7,8186	6,9145
27,0	66,72	1,0209	5,7739	279,24	2621,1	2341,9	0,9146	7,8057	6,8911
28,0	67,55	1,0214	5,5804	282,70	2622,6	2339,9	0,9248	7,7932	6,8684
29,0	68,35	1,0219	5,3998	286,05	2624,0	2337,9	0,9346	7,7811	6,8465
30,0	69,12	1,0223	5,2308	289,31	2625,3	2336,0	0,9441	7,7695	6,8251
32,0	70,62	1,0232	4,9238	295,55	2627,8	2332,2	0,9623	7,7474	6,7851
34,0	72,03	1,0241	4,6518	301,48	2630,3	2328,8	0,9795	7,7266	6,7471
36,0	73,37	1,0249	4,4092	307,12	2632,5	2325,4	0,9958	7,7070	6,7112
38,0	74,66	1,0257	4,1915	312,50	2634,7	2322,2	1,0113	7,6886	6,6773
40,0	75,89	1,0265	3,9949	317,65	2636,8	2319,2	1,0261	7,6711	6,6450
42,0	77,06	1,0272	3,8165	322,60	2638,8	2316,2	1,0403	7,6544	6,6141
44,0	78,19	1,0280	3,6537	327,36	2640,7	2313,3	1,0539	7,6386	6,5847
46,0	79,28	1,0287	3,5047	331,95	2642,5	2310,5	1,0669	7,6234	6,5565
48,0	80,33	1,0294	3,3678	335,35	2644,3	2308,9	1,0794	7,6090	6,5296
50,0	81,35	1,0301	3,2415	340,57	2646,0	2305,4	1,0912	7,5951	6,5039
55,0	83,74	1,0317	2,9648	350,61	2650,0	2299,4	1,1194	7,5627	6,4433
60,0	85,95	1,0333	2,7329	359,93	2653,6	2293,7	1,1454	7,5332	6,3878
65,0	88,02	1,0347	2,5357	368,62	2657,0	2288,4	1,1696	7,5061	6,3365
70,0	89,96	1,0361	2,3658	376,77	2660,2	2283,4	1,1921	7,4811	6,2890
75,0	91,78	1,0375	2,2179	384,45	2663,2	2278,8	1,2132	7,4577	6,2445
80,0	93,51	1,0387	2,0879	391,72	2666,0	2274,3	1,2330	7,4360	6,2030
85,0	95,14	1,0400	1,9728	398,63	2668,6	2270,0	1,2518	7,4155	6,1637
90,0	96,71	1,0412	1,8701	405,21	2671,1	2265,9	1,2696	7,3963	6,1267
95,0	98,20	1,0423	1,7779	411,49	2673,5	2262,0	1,2865	7,3781	6,0916
100,0	99,63	1,0434	1,6946	417,51	2675,7	2258,2	1,3027	7,3608	6,0581

Таблица 5

Термодинамические свойства воды и перегретого пара [11]

t, °C	v, м³/кг	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)	v, м³/кг	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)	v, м³/кг	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)
	p = 1 кПа			p = 2 кПа			p = 3 кПа		
	t_s = 6,982°C			t_s = 17,511°C			t_s = 24,098°C		
	v'=0,0010001; v''=129,208;			v'=0,0010012; v''=67,006;			v'=0,0010027; v''=45,668;		
	h'=29,33; h''=2513,8;			h'=73,45; h''=2533,2;			h'=101,00; h''=2545,2;		
	s'=0,1060; s''=8,9756			s'=0,2606; s''=8,7236			s'=0,3543; s''=8,5776		
0	0,0010002	0,0	–0,0001	0,0010002	0,0	–0,0001	0,0010002	0,0	–0,0001
10	130,60	2519,5	8,9956	0,0010002	42,0	0,1510	0,0010002	42,0	0,1510
20	135,23	2538,1	9,0604	67,58	2537,8	8,7396	0,0010017	83,9	0,2963
30	139,85	2556,8	9,1230	69,90	2556,5	8,8032	46,58	2556,3	8,6145
40	144,47	2575,5	9,1837	72,21	2575,3	8,8632	48,13	2575,0	8,6755
50	149,09	2594,2	9,2426	74,53	2594,0	8,9222	49,67	2593,8	8,7345

t, °C	v, м³/кг	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)	v, м³/кг	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)	v, м³/кг	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)
	p = 4 кПа			p = 5 кПа			p = 6 кПа		
	t_s = 28,981°C			t_s = 32,90°C			t_s = 36,18°C		
	v'=0,0010040; v''=34,803;			v'=0,0010052; v''=28,196;			v'=0,0010064; v''=23,742;		
	h'=121,41; h''=2554,1;			h'=137,77; h''=2561,2;			h'=151,50; h''=2567,1;		
	s'=0,4224; s''=8,4747			s'=0,4762; s''=8,3952			s'=0,5209; s''=8,3305		
0	0,0010002	0,0	–0,0001	0,0010002	0,0	–0,0001	0,0010002	0,0	–0,0001
10	0,0010002	42,0	0,1510	0,0010002	42,0	0,1510	0,0010002	42,0	0,1510
20	0,0010017	83,9	0,2963	0,0010017	83,9	0,2963	0,0010017	83,9	0,2963
30	34,92	2556,0	8,4810	0,0010043	125,7	0,4365	0,0010043	125,7	0,4365
40	36,08	2574,8	8,5421	28,86	2574,6	8,4385	24,04	2574,3	8,3537
50	37,24	2593,6	8,6012	29,78	2593,4	8,4977	24,81	2593,2	8,4130

t, °C	v, м³/кг	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)	v, м³/кг	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)	v, м³/кг	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)
	p = 7 кПа			p = 8 кПа			p = 9 кПа		
	t_s = 39,02°C			t_s = 41,53°C			t_s = 43,79°C		
	v'=0,0010074; v''=20,532;			v'=0,0010084; v''=18,106;			v'=0,0010094; v''=16,206;		
	h'=163,38; h''=2572,2;			h'=173,87; h''=2576,7;			h'=183,28; h''=2580,8;		
	s'=0,5591; s''=8,2760			s'=0,5926; s''=8,2289			s'=0,6224; s''=8,1875		
0	0,0010002	0,0	–0,0001	0,0010002	0,0	–0,0001	0,0010002	0,0	–0,0001
10	0,0010002	42,0	0,1510	0,0010002	42,0	0,1510	0,0010002	42,0	0,1510
20	0,0010017	83,9	0,2963	0,0010017	83,9	0,2963	0,0010017	83,9	0,2963
30	0,0010043	125,7	0,4365	0,0010043	125,7	0,4365	0,0010043	125,7	0,4365
40	20,60	2574,1	8,2819	0,0010078	167,4	0,5721	0,0010078	167,4	0,5721
50	21,26	2593,0	8,3414	18,60	2592,8	8,2792	16,53	2592,6	8,2243

Окончание табл. 5

t, °C	p = 10 кПа t_s = 45,83°C v'=0,0010102; v''=14,676; h'=191,84; h''=2584,4; s'=0,6493; s''=8,1505			p = 12 кПа t_s = 49,45°C v'=0,0010119; v''=12,364; h'=206,94; h''=2590,9; s'=0,6963; s''=8,0867			p = 14 кПа t_s = 52,58°C v'=0,0010133; v''=10,696; h'=220,03; h''=2596,4; s'=0,7367; s''=8,0330		
	v, м³/кг	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)	v, м³/кг	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)	v, м³/кг	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)
0	0,0010002	0,0	–0,0001	0,0010002	0,0	–0,0001	0,0010002	0,0	–0,0001
10	0,0010002	42,0	0,1510	0,0010002	42,0	0,1510	0,0010002	42,0	0,1510
20	0,0010017	83,9	0,2963	0,0010017	83,9	0,2963	0,0010017	83,9	0,2963
30	0,0010043	125,7	0,4365	0,0010043	125,7	0,4365	0,0010043	125,7	0,4365
40	0,0010078	167,4	0,5721	0,0010078	167,5	0,5721	0,0010078	167,5	0,5721
50	14,87	2592,3	8,1752	12,385	2591,9	8,0900	0,0010121	209,3	0,7035

t, °C	p = 16 кПа t_s = 55,34°C v'=0,0010147; v''=9,4348; h'=231,60; h''=2601,3; s'=0,7721; s''=7,9865			p = 18 кПа t_s = 57,83°C v'=0,0010160; v''=8,4470; h'=242,00; h''=2605,7; s'=0,8036; s''=7,9456			p = 20 кПа t_s = 60,09°C v'=0,0010172; v''=7,6515; h'=251,46; h''=2609,6; s'=0,8321; s''=7,9092		
	v, м³/кг	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)	v, м³/кг	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)	v, м³/кг	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)
0	0,0010002	0,0	–0,0001	0,0010002	0,0	–0,0001	0,0010002	0,0	–0,0001
10	0,0010002	42,0	0,1510	0,0010002	42,0	0,1510	0,0010002	42,0	0,1510
20	0,0010017	83,9	0,2963	0,0010017	83,9	0,2963	0,0010017	83,9	0,2963
30	0,0010043	125,7	0,4365	0,0010043	125,7	0,4365	0,0010043	125,7	0,4365
40	0,0010078	167,5	0,5721	0,0010078	167,5	0,5721	0,0010078	167,5	0,5721
50	0,0010121	209,3	0,7035	0,0010121	209,3	0,7035	0,0010121	209,3	0,7035

t, °C	p = 22 кПа t_s = 62,16°C v'=0,0010183; v''=6,9967; h'=260,14; h''=2613,2; s'=0,8581; s''=7,8762		
	v, м³/кг	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)
0	0,0010002	0,0	–0,0001
10	0,0010002	42,0	0,1510
20	0,0010017	83,9	0,2963
30	0,0010043	125,7	0,4365
40	0,0010078	167,5	0,5721
50	0,0010121	209,3	0,7035

Таблица 6

Парциальное давление насыщенного водяного пара, массовое влагосодержание и удельная энтальпия влажного воздуха [1]

t, °С	p'', кПа	d, г/кг с.в (p = 101 кПа)	ξ, г/м^3	$h''_{вл.в}$, кДж/кг
		Надо льдом		
– 50	$3{,}9\cdot10^{-3}$	$2{,}41\cdot10^{-2}$	0,039	–
– 48	$5{,}0\cdot10^{-3}$	$3{,}09\cdot10^{-2}$	0,049	–
– 46	$6{,}4\cdot10^{-3}$	$3{,}94\cdot10^{-2}$	0,061	–
– 44	$8{,}1\cdot10^{-3}$	$4{,}99\cdot10^{-2}$	0,077	–
– 42	$1{,}02\cdot10^{-2}$	$6{,}28\cdot10^{-2}$	0,096	–
– 40	$1{,}28\cdot10^{-2}$	$7{,}91\cdot10^{-2}$	0,120	– 40,03
– 38	$1{,}60\cdot10^{-2}$	$9{,}89\cdot10^{-2}$	0,150	– 37,97
– 36	$2{,}00\cdot10^{-2}$	0,122	0,180	– 35,90
– 34	$2{,}49\cdot10^{-2}$	0,153	0,230	– 33,81
– 32	$3{,}08\cdot10^{-2}$	0,191	0,280	– 31,72
– 30	$3{,}79\cdot10^{-2}$	0,234	0,340	– 29,60
– 29	$4{,}22\cdot10^{-2}$	0,260	0,380	– 28,53
– 28	$4{,}67\cdot10^{-2}$	0,287	0,410	– 27,45
– 27	$5{,}17\cdot10^{-2}$	0,318	0,460	– 26,37
– 26	$5{,}72\cdot10^{-2}$	0,352	0,500	– 25,28
– 25	$6{,}33\cdot10^{-2}$	0,390	0,550	– 24,18
– 24	$7{,}00\cdot10^{-2}$	0,430	0,610	– 23,07
– 23	$7{,}71\cdot10^{-2}$	0,475	0,670	– 21,95
– 22	$8{,}51\cdot10^{-2}$	0,524	0,730	– 20,82
– 21	$9{,}38\cdot10^{-2}$	0,577	0,800	– 19,68
– 20	0,1032	0,630	0,880	– 18,53
– 19	0,1136	0,697	0,970	– 17,37
– 18	0,1249	0,765	1,060	– 16,18
– 17	0,1371	0,845	1,160	– 14,99
– 16	0,1506	0,925	1,270	– 13,77
– 15	0,1651	1,020	1,390	– 12,54
– 14	0,1810	1,110	1,520	– 11,28
– 13	0,1981	1,220	1,660	– 10,01
– 12	0,2171	1,340	1,810	– 8,72
– 11	0,2374	1,470	1,970	– 7,39
– 10	0,2595	1,600	2,140	– 6,04
– 9	0,2834	1,750	2,330	– 4,66
– 8	0,3094	1,920	2,530	– 3,25
– 7	0,3374	2,080	2,750	– 1,80
– 6	0,3677	2,280	2,990	– 0,31
– 5	0,4007	2,480	3,340	1,21
– 4	0,4362	2,690	3,520	2,78
– 3	0,4745	2,940	3,820	4,40
– 2	0,5160	3,190	4,130	6,06
– 1	0,5609	3,480	4,480	7,78
0	0,6100	3,780	4,840	9,56

Продолжение табл. 6

t, °C	p'', кПа	d, г/кг с.в (p = 101 кПа)	ξ, г/м^3	$h''_{вл.в}$, кДж/кг
		Над переохлаждённой водой		
– 15	0,191	1,175	1,61	–
– 14	0,2075	1,28	1,76	–
– 13	0,2249	1,385	1,88	–
– 12	0,2439	0,505	2,03	–
– 11	0,2643	1,63	2,19	–
– 10	0,2858	1,765	2,34	–
– 9	0,3094	1,91	2,54	–
– 8	0,3344	2,06	2,74	–
– 7	0,3611	2,22	2,95	–
– 6	0,3898	2,41	3,17	–
– 5	0,4207	2,60	3,41	–
– 4	0,4545	2,80	3,66	–
– 3	0,4885	3,02	3,91	–
– 2	0,5281	3,26	4,22	–
– 1	0,5683	3,50	4,52	–
		Над водой		
0	0,610	3,77	4,84	9,56
1	0,657	4,06	5,20	11,29
2	0,705	4,36	5,57	13,08
3	0,758	4,70	5,96	14,91
4	0,813	5,04	6,37	16,81
5	0,872	5,40	6,80	18,76
6	0,935	5,79	7,27	20,77
7	1,001	6,20	7,76	22,85
8	1,072	6,66	8,28	25,00
9	1,147	7,13	8,83	27,22
10	1,227	7,63	9,40	29,52
11	1,312	8,15	10,03	31,90
12	1,402	8,74	10,68	34,37
13	1,497	9,31	11,37	36,93
14	1,598	9,95	12,09	39,59
15	1,704	10,62	12,82	42,3
16	1,817	11,33	13,65	45,2
17	1,937	12,10	14,50	48,2
18	2,063	12,90	15,40	51,3
19	2,196	13,73	16,33	54,5
20	2,337	14,61	17,29	57,8
21	2,486	15,60	18,35	61,3
22	2,643	16,60	19,45	65,0
23	2,809	17,68	20,60	68,8
24	2,983	18,81	21,80	72,8

Окончание табл. 6

t, °C	p'', кПа	d, г/кг с.в (p = 101 кПа)	ξ, г/м^3	$h''_{вл.в}$, кДж/кг
25	3,167	19,95	23,04	76,9
26	3,361	21,20	24,40	81,2
27	3,565	22,55	25,80	85,8
28	3,780	24,00	27,24	90,5
29	4,006	25,94	28,78	95,4
30	4,243	27,55	30,36	100,6
31	4,493	29,25	32,08	106,0
32	4,755	31,04	33,84	111,6
33	5,031	32,94	35,65	117,5
34	5,320	34,94	37,58	123,7
35	5,624	37,0	39,60	130,3
36	5,942	39,2	41,71	137,1
37	6,276	41,6	43,91	144,2
38	6,626	44,1	46,21	151,7
39	6,993	46,7	48,61	159,6
40	7,378	49,5	51,14	167,8
41	7,780	52,4	53,73	176,4
42	8,202	55,5	56,46	185,5
43	8,642	58,8	59,36	195,1
44	9,103	62,2	62,32	205,1
45	9,590	65,9	65,44	215,6
46	10,090	69,7	68,69	226,7
47	10,620	73,8	72,04	238,4
48	11,170	78,1	75,51	250,7
49	11,740	82,7	79,13	263,7
50	12,340	87,5	82,98	277,5

Таблица 7

Физические свойства влажного воздуха на линии насыщения при p = 100 кПа [1]

t, °С	ξ, г/м^3	$v_{вл.в}$, м^3/кг с.в	$\nu \cdot 10^6$, м^2/с	c_p, кДж (кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$, Вт (м·К)
0	4,846	0,7781	13,25	1,0108	2,380
2	5,557	0,7845	13,43	1,0120	2,413
4	6,358	0,7911	13,61	1,0134	2,427
6	7,257	0,7977	13,79	1,0149	2,440
8	8,267	0,8046	13,97	1,0167	2,454
10	9,396	0,8116	14,15	1,0186	2,466
12	10,66	0,8187	14,34	1,0208	2,478
14	12,06	0,8261	14,52	1,0233	2,490
16	13,63	0,8337	14,71	1,0260	2,500
18	15,36	0,8415	14,89	1,0291	2,511
20	17,29	0,8497	15,08	1,0325	2,520
22	19,42	0,8511	15,27	1,0364	2,529
24	21,77	0,8669	15,46	1,0407	2,537
26	24,37	0,8761	15,65	1,0455	2,544
28	27,23	0,8857	15,84	1,0509	2,508
30	30,36	0,8958	16,03	1,0569	2,556
32	33,80	0,9065	16,22	1,0635	2,561
34	37,58	0,9178	16,41	1,0710	2,565
36	41,71	0,9297	16,61	1,0793	2,567
38	46,22	0,9425	16,80	1,0885	2,569
40	51,14	0,9560	17,00	1,0989	2,569
42	56,50	0,9706	17,20	1,1103	2,568
44	62,33	0,9862	17,39	1,1232	2,666
46	68,67	1,0030	17,59	1,1375	2,563
48	75,53	1,0213	17,79	1,1534	2,558
50	82,98	1,0410	17,99	1,1713	2,552

Таблица 8

Массовое влагосодержание, г/кг сухого воздуха, при общем давлении p = 101 кПа для различных температур и относительной влажности [1]

t, °C	Массовое влагосодержание при φ, %																			
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
10	0,38	0,75	1,13	1,51	1,89	2,27	2,65	3,03	3,41	3,79	4,17	4,55	4,94	5,32	5,70	6,09	6,47	6,86	7,24	7,63
11	0,40	0,81	1,21	1,62	2,02	2,43	2,83	3,24	3,65	4,05	4,46	4,87	5,28	5,69	6,10	6,51	6,92	7,34	7,75	8,16
12	0,43	0,86	1,29	1,73	2,16	2,59	3,03	3,46	3,90	4,33	4,77	5,21	5,65	6,08	6,52	6,96	7,40	7,84	8,29	8,73
13	0,46	0,92	1,38	1,84	2,31	2,77	3,23	3,70	4,16	4,63	5,10	5,56	6,03	6,50	6,97	7,44	7,91	8,38	8,86	9,33
14	0,49	0,98	1,48	1,97	2,46	2,96	3,45	3,95	4,45	4,94	5,44	5,94	6,44	6,94	7,45	7,95	8,45	8,96	9,46	9,97
15	0,52	1,05	1,57	2,10	2,63	3,16	3,68	4,21	4,75	5,28	5,81	6,34	6,88	7,41	7,95	8,49	9,03	9,56	10,10	10,65
16	0,56	1,12	1,68	2,24	2,80	3,37	3,93	4,50	5,06	5,63	6,20	6,77	7,34	7,91	8,48	9,06	9,63	10,21	10,79	11,36
17	0,60	1,19	1,79	2,39	2,99	3,59	4,19	4,79	5,40	6,00	6,61	7,22	7,83	8,44	9,05	9,66	10,28	10,89	11,51	12,13
18	0,63	1,27	1,91	2,54	3,18	3,82	4,47	5,11	5,75	6,40	7,05	7,70	8,35	9,00	9,65	10,30	10,96	11,61	12,27	12,93
19	0,68	1,35	2,03	2,71	3,39	4,07	4,76	5,44	6,13	6,82	7,51	8,20	8,89	9,59	10,28	10,98	11,68	12,38	13,08	13,79
20	0,72	1,44	2,16	2,88	3,61	4,34	5,06	5,80	6,53	7,26	8,00	8,73	9,47	10,21	10,95	11,70	12,44	13,19	13,94	14,69
21	0,76	1,53	2,30	3,07	3,84	4,61	5,39	6,17	6,95	7,73	8,51	9,30	10,08	10,87	11,67	12,46	13,25	14,05	14,85	15,65
22	0,81	1,63	2,44	3,26	4,08	4,91	5,73	6,56	7,39	8,22	9,06	9,89	10,73	11,57	12,42	13,26	14,11	14,96	15,81	16,67
23	0,86	1,73	2,60	3,47	4,34	5,22	6,10	6,98	7,86	8,75	9,63	10,52	11,42	12,81	13,21	14,11	15,02	15,92	16,83	17,74
24	0,92	1,84	2,76	3,69	4,61	5,55	6,48	7,42	8,36	9,30	10,24	11,19	12,14	13,10	14,05	15,01	15,97	16,94	17,91	18,88
25	0,97	1,95	2,93	3,91	4,90	5,89	6,88	7,88	8,88	9,88	10,89	11,89	12,91	13,92	14,94	15,96	16,99	18,01	19,05	20,08
26	1,03	2,07	3,11	4,16	5,20	6,26	7,31	8,37	9,43	10,50	11,56	12,64	13,71	14,79	15,88	16,96	18,06	19,15	20,25	21,35
27	1,10	2,20	3,30	4,41	5,52	6,64	7,76	8,88	10,01	11,14	12,28	13,42	14,57	15,71	16,87	18,03	19,19	20,35	21,52	22,70
28	1,16	2,33	3,50	4,68	5,86	7,04	8,23	9,43	10,63	11,83	13,04	14,25	15,47	16,69	17,91	19,14	20,38	21,62	22,87	24,12
29	1,23	2,47	3,71	4,96	6,21	7,47	8,73	10,00	11,27	12,55	13,83	15,12	16,42	17,71	19,02	20,33	21,64	22,96	24,29	25,62
30	1,31	2,62	3,93	5,26	6,59	7,92	9,26	10,60	11,96	13,31	14,67	16,04	17,42	18,80	20,18	21,58	22,97	24,38	25,79	27,21
31	1,38	2,77	4,17	5,57	6,98	8,39	9,81	11,44	12,67	14,11	15,56	17,01	18,47	19,94	21,41	22,89	24,38	25,87	27,38	28,88
32	1,46	2,94	4,41	5,90	7,39	8,89	10,40	11,91	13,43	14,96	16,49	18,04	19,59	21,15	22,71	24,28	25,87	27,45	29,05	30,65
33	1,55	3,11	4,67	6,24	7,82	9,41	11,01	12,96	14,23	15,85	17,48	19,12	20,76	22,42	24,08	25,75	27,43	29,12	30,82	32,53
34	1,64	3,29	4,94	6,61	8,28	9,96	11,66	13,36	15,07	16,79	18,51	20,25	22,00	23,76	25,52	27,30	29,09	30,88	32,69	34,50

Список литературы

1. Воронец Д., Козич Д. Влажный воздух. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 136 с.

2. Головко Г.А. Установки для производства инертных газов. – Л.: Машиностроение, 1974. – 383 с.

3. Захаров Ю.В. Судовые установки кондиционирования воздуха и холодильные машины. – СПб.: Судостроение, 1994. – 504 с.

4. Крум Д., Робертс Б. Кондиционирование воздуха и вентиляция зданий. – М.: Стройиздат, 1980. – 399 с.

5. Малков М.П., Данилов И.Б., Зельдович А.Г. и др. Справочник по физико-техническим основам криогеники. – М.: Энергия, 1973. – 392 с.

6. Погосян Х.П., Туркетти З.Л. Атмосфера Земли. – М.: Просвещение, 1970. – 320 с.

7. Бэр Г.Д. Техническая термодинамика. – М.: Мир, 1977. – 518 с.

8. Защита радиоэлектронной аппаратуры от влияния климатических условий / Под ред. Г. Юбиша. Пер. с нем. – М.: Энергия, 1970. – 368 с.

9. Блютген И. География климатов. Пер. с нем. Т. 1. – М.: Прогресс, 1972. – 430 с.

10. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. – М.: Высш. шк., 1969. – 560 с.

11. Вукалович М.П. Термодинамические свойства воды и водяного пара. – М.: Машиностроение, 1967. – 160 с. с диагр.

12. Таблицы психрометрические. ГОСТ 8.524 – 85. – М.: 1985. – 34 с.

13. Амелин А.Г. Теоретические основы образования тумана при конденсации пара. – М.: Химия, 1966. – 296 с.

14. Калафати Д.Д. Область плавления льда в S–T-диаграмме. Журнал технической физики, т. XXIV, вып. 2, 1954. – С. 184–192.

15. Паундер Э. Физика льда. – М.: Мир, 1967. – 190 с.

16. Богданов С.Н., Иванов О.И., Куприянова А.В. Холодильная техника. Свойства веществ. – М.: Агропромиздат, 1985. – 208 с.

17. Амелин А.Г., Яшке Е.В., Калганов В.А. Туманы служат человеку. – М.: Наука, 1985. – 120 с.

18. Грин Х., Лейн В. Аэрозоли – пыли, дымы и туманы. – Л.: Химия Л.О., 1972. – 428 с.

19. Кушнырёв В.И., Лебедев В.И., Павленко В.А. Техническая термодинамика и теплопередача. – М.: Стройиздат, 1986. – 464 с.

20. Кокорин О.Я. Установки кондиционирования воздуха. – М.: Машиностроение, 1970. – 344 с.

21. Богословский С.И. Строительная теплофизика. – М.: Высш. шк., 1970. – 376 с.

22. Нестеренко А.В. Основы термодинамических расчётов вентиляции и кондиционирования воздуха. – М.: Высш. шк., 1962. – 355 с.

23. Бродянский В.М. Эксергетический метод термодинамического анализа. – М.: Энергия, 1973. – 288 с.

24. Эльснер Н., Фратшер В. Составление эксергетического анализа газотурбинной установки. // Вопросы термодинамического анализа. – М.: Энергия, 1965. – С. 29–34.

25. Прохоров В.И., Шилклопер С.М. Вычисление эксергии воды и льда в потоке влажного воздуха. // Холодильная техника, 1981. – № 12. – С. 28–32.

****

Содержание

Список основных условных обозначений 3
Предисловие 5
1.Термодинамика идеальных газов и смесей. Основные понятия и соотношения 7
1.1. Основные положения 7
1.2. Идеальный газ 11
1.3. Свойства газовых смесей 20
1.3.1. Газовая смесь 20
1.3.2. Состав газовой смеси 20
1.3.3. Закон Дальтона 22
1.3.4. Газовая постоянная смеси 23
1.3.5. Молекулярная масса газовой смеси 23
1.3.6. Парциальное давление компонентов газовой смеси 24
1.3.7. Удельная теплоёмкость газовой смеси 25
1.3.8. Энтальпия идеальной газовой смеси 26
1.3.9. Энтропия идеальной газовой смеси 26
1.3.10. Эксергия идеальной газовой смеси 27
1.4. Термодинамические процессы идеальных газов 27
1.4.1. Изохорный процесс (v = const) 27
1.4.2. Изобарный процесс (p = const) 29
1.4.3. Изотермический процесс (T = const) 30
1.4.4. Адиабатный процесс (dq = 0 и q = 0) 32
1.4.5. Политропный процесс 32

2. Сухой воздух 34
2.1. Состав сухого воздуха 34
2.2. Газовая постоянная и мольная масса сухого воздуха 37
2.3. Плотность и удельный объём сухого воздуха 37
2.4. Удельная теплоёмкость сухого воздуха 38
2.5. Парциальные давления компонентов сухого воздуха 40
2.6. Энтальпия, энтропия и эксергия сухого воздуха 41

3. Вода 44
3.1. Общие положения 44
3.2. Фазовые диаграммы для воды 50
3.2.1. Фазовая p–t-диаграмма 50
3.2.2. Влияние кривизны поверхности раздела фаз на давление насыщения 55

3.2.3. Фазовая *s–t*-диаграмма ... 58
3.3. Твёрдая фаза – лёд ... 61
3.4. Жидкая фаза – вода ... 64
3.5. Газообразная фаза – водяной пар ... 69
3.5.1. Сухой насыщенный пар ... 69
3.5.2. Перегретый пар ... 72
3.5.3. Влажный пар ... 74

4. Влажный воздух ... 75
4.1. Состав влажного воздуха ... 75
4.2. Параметры влажного воздуха ... 76
4.3. Гомогенная смесь влажного воздуха ... 80
4.3.1. Ненасыщенный влажный воздух ... 80
4.3.2. Насыщенный влажный воздух ... 85
4.3.3. Пересыщенный влажный воздух ... 86
4.4. Гетерогенная смесь влажного воздуха ... 87
4.4.1. Образование тумана ... 87
4.4.2. Характеристики тумана ... 92
4.4.3. Водяной туман ... 95
4.4.4. Ледяной туман ... 97
4.4.5. Смешанный туман ... 98
4.5. Расчётные формулы для определения энтальпии влажного воздуха ... 99
4.6. Энтропия влажного воздуха ... 106
4.7. Эксергия влажного воздуха ... 109
4.7.1. Общие положения ... 109
4.7.2. Эксергия влажного ненасыщенного воздуха ... 112
4.7.3. Эксергия воды ... 115
4.7.4. Эксергия льда ... 120
4.7.5. Эксергия тумана ... 123
4.8. Параметры влажного воздуха при изменении состава сухого воздуха ... 125

Приложение ... 128

Список литературы ... 142

10 Зак. 3799

Сергей Иванович Бурцев
Юрий Николаевич Цветков

ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ. СОСТАВ И СВОЙСТВА

Учебное пособие

ИБ № 79

ISBN 5–89565–005–8

Редактор Т.В. Белянкина
Корректор Н.И. Михайлова
Компьютерный набор и вёрстка Д.Е. Мышковский

Лицензия ЛР № 020414 от 12.02.97
Подписано к печати 29.05.98. Формат 70x108 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетн
Печ. л. 10. Тираж 700 экз. Заказ № 3799. С 46

СПбГАХПТ. 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

Отпечатано в Санкт-Петербургской типографии "Наука" РАН
199034, Санкт-Петербург, ВО, 9-я линия, 12