

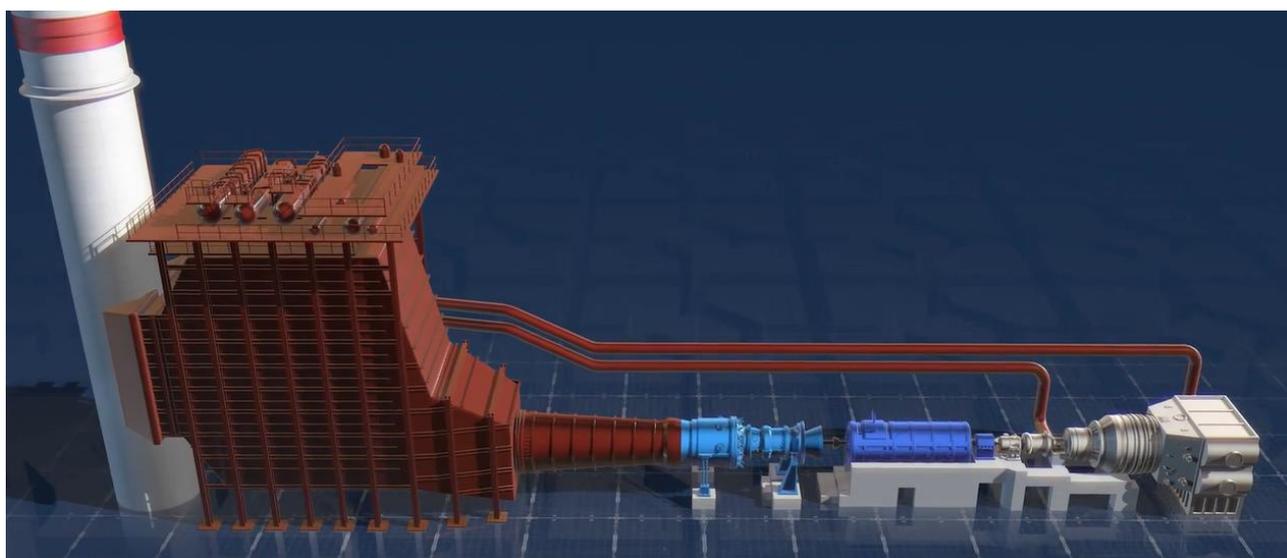
Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
Брянский государственный аграрный университет

Михайличенко С.М., Купреенко А.И., Исаев Х.М.

ТЕПЛОТЕХНИКА

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Методическое пособие по выполнению практических и самостоятельных работ



Брянская область, 2022

УДК 621.1 (076)

ББК 31.3

М 69

Михайличенко, С. М. Теплотехника. Примеры решения задач: методическое пособие по выполнению практических и самостоятельных работ по дисциплине «Теплотехника и теплоснабжение предприятий пищевых производств» / С. М. Михайличенко, А. И. Купреенко, Х. М. Исаев. – Брянск: Изд-во Брянской ГАУ, 2022. – 132 с.

Методическое пособие содержит теоретические положения, справочный материал и примеры решения задач для выполнения практических и самостоятельных работ по дисциплине «Теплотехника и теплоснабжение предприятий пищевых производств» и включает в себя шесть разделов: «Термодинамические параметры состояния», «Идеальные газы и основные газовые законы», «Газовые смеси», «Анализ термодинамических процессов», «Водяной пар», «Влажный воздух». Предназначено для студентов очной и заочной форм обучения направления подготовки 35.03.06 Агроинженерия, профили Технические системы в агробизнесе, Технологическое оборудование для хранения и переработки сельскохозяйственной продукции, Электрооборудование и электротехнологии, Технический сервис в АПК

Рецензент:

А.М. Случевский – к.т.н., доцент кафедры технических систем в агробизнесе, природообустройстве и дорожном строительстве.

Рекомендовано к изданию решением учебно-методической комиссией инженерно-технологического института от 28 апреля 2022 г., протокол № 6.

© Брянский ГАУ, 2022

© Михайличенко С.М., 2022

© Купреенко А.И., 2022

© Исаев Х.М., 2022

Содержание

Предисловие.....	5
Раздел 1. Термодинамические параметры состояния.....	6
1.1. Краткие теоретические сведения.....	6
1.2. Задания для практических работ	10
1.3. Задания для самостоятельной работы.....	20
Раздел 2. Идеальные газы и основные газовые законы.....	28
2.1. Краткие теоретические сведения.....	28
2.2. Задания для практических работ	31
2.3. Задания для самостоятельной работы.....	40
Раздел 3. Газовые смеси.....	47
3.1. Краткие теоретические сведения.....	47
3.2. Задания для практических работ	50
3.3. Задания для самостоятельной работы.....	56
Раздел 4. Анализ термодинамических процессов.....	62
4.1. Краткие теоретические сведения.....	62
4.2. Задания для практических работ	66
4.3. Задания для самостоятельной работы.....	70
Раздел 5. Водяной пар.....	74
5.1. Краткие теоретические сведения.....	74
5.2. Задания для практических работ	82
5.3. Задания для самостоятельной работы.....	85
Раздел 6. Влажный воздух.....	89
6.1. Краткие теоретические сведения.....	89
6.2. Задания для практических работ	96
6.3. Задания для самостоятельной работы.....	101
Литература	107
Приложения	108
Приложение 1 – термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по температуре).....	109
Приложение 2 – термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по давлению)	114
Приложение 3 – термодинамические свойства воды и перегретого пара.....	121

Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины (модуля):

ОПК-1: Способен решать типовые задачи профессиональной деятельности на основе знаний основных законов математических и естественных наук с применением информационно-коммуникационных технологий;

Материалы и задания, представленные в данном методическом пособии, будут способствовать формированию указанных компетенций в результате освоения дисциплины «Теплотехника».

Предисловие

Задачей практических и самостоятельных работ является закрепление знаний студентов по курсу «Теплотехника». При выполнении работ студенты используют знания, полученные при изучении курсов «Физика», «Теоретическая механика», «Химия», «Гидравлика».

Данное методическое пособие включает в себя шесть разделов: «Термодинамические параметры состояния», «Идеальные газы и основные газовые законы», «Газовые смеси», «Анализ термодинамических процессов», «Водяной пар», «Влажный воздух». В каждом разделе приведены необходимые теоретические сведения и рассмотрены примеры решения задач с соответствующими пояснениями.

Проведение учебного процесса предусматривает решение студентами приведенных в пособии задач на практических занятиях и при самостоятельной работе в соответствии с исходными данными своего варианта.

Решенные задачи оформляются отдельно по каждому разделу и представляются к защите.

РАЗДЕЛ 1. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ

1.1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Физические величины, однозначно определяющие состояние рабочего тела или термодинамической системы, называются *термодинамическими параметрами состояния*. К ним относятся *температура, давление и удельный объем* или *плотность*.

1. Удельный объем v (м³/кг) – это объем, занимаемый единицей массы вещества. Данный параметр показывает, какой объем будет занимать 1 кг вещества.

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

где

V – объем тела, м³;

m – масса тела, кг.

Величина, обратная удельному объему, представляет собой массу единицы объема и называется *плотностью ρ* (кг/м³):

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

2. Давление p (Па) представляется собой силу, действующую на единицу площади поверхности и направленную по нормали (перпендикулярно) к этой поверхности. Необходимо учитывать, что параметром состояния является *абсолютное давление $p_{\text{абс}}$* – давление, отсчитанное от нуля.

На практике помимо паскалей (Па = Н/м²) также пользуются единицами измерения, которые приведены в таблице 1.1. Пользуясь данными зависимостями, можно переводить одни единицы измерения в другие.

Таблица 1.1 – Основные единицы измерения давления

Название	Обозначение	Размерность	Значение в Па
паскаль	Па	Н/м ²	1
килопаскаль	кПа	кН/м ²	10 ³
мегапаскаль	МПа	МН/м ²	10 ⁶
бар	бар	0,1 МН/м ²	10 ⁵
* килограмм-сила на квадратный метр	кгс/м ²	9,81 Н/м ²	9,80665
миллиметр водного столба	мм вод. ст.	мм	9,80665
метр водного столба	м вод. ст.	м	9806,65
миллиметр ртутного столба	мм рт.ст.	мм	133,322
техническая атмосфера	ат	кгс/см ²	98066,5
физическая атмосфера	атм	760 мм рт.ст.	101325
фунт-сила на квадратный дюйм	psi (lbs)	lbf/in ²	6894,76

* Под килограммом-силы понимают силу, которая сообщает покоящейся массе в 1 килограмм ускорение, равное нормальному ускорению свободного падения (9,80665 м/с²). Иными словами – это сила (вес), с которой объект массой в 1 кг действует на поверхность, т.е. $1 \text{ кгс} = mg = 1 \text{ кг} \cdot 9,80665 \text{ м/с}^2 = 9,80665 \text{ Н}$.

Давление измеряют с помощью специальных приборов – барометров, манометров и вакуумметров. Также существуют приборы, позволяющие определить значение абсолютного давления.

Атмосферное (барометрическое) давление V измеряется приборами, которые называются барометрами, и обычно указывается в миллиметрах ртутного столба (мм рт.ст.).

Приборы для измерения давления выше атмосферного называют манометрами. Они указывают величину избыточного (манометрического) давления $p_{изб}$ по отношению к атмосферному, т.е. по их показаниям судят о том, на сколько действующее давление превышает атмосферное. При вычислении абсолютного давления по показаниям манометра пользуются формулой (рис. 1.1):

$$p_{абс} = B + p_{изб},$$

где $p_{изб}$ – избыточное давление по показаниям манометра, Па.

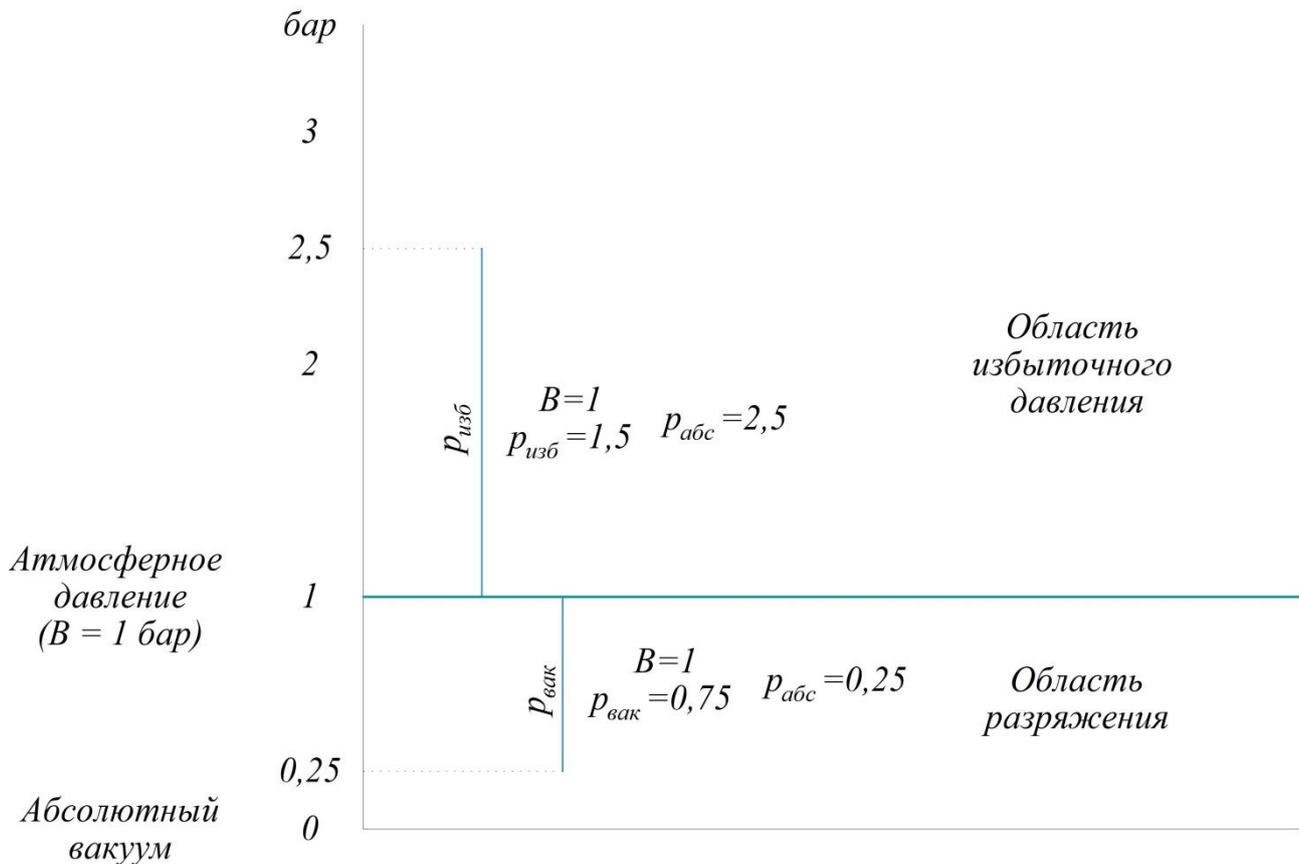


Рисунок 1.1 – К определению абсолютного давления

Абсолютное давление ниже атмосферного называют разрежением или вакуумом. Приборы для измерения давления ниже атмосферного называют вакуумметрами. Они указывают величину разрежения – недостаток давления по отношению к атмосферному, т.е. по их показаниям судят о том, на сколько действующее давление меньше атмосферного. При вычислении абсолютного давления по показаниям вакуумметра пользуются формулой (рис. 1.1):

$$p_{абс} = B - p_{вак},$$

где $p_{вак}$ – вакуумметрическое давление по показаниям вакуумметра, Па.

Величина избыточного (вакуумметрического) давления по показаниям жидкостного манометра (вакуумметра) может быть найдена по формуле:

$$p_{\text{изб}} (p_{\text{вак}}) = \rho g \Delta h ,$$

где

ρ – плотность рабочей жидкости, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

Δh – разность высот столбов жидкости, м.

2. Температура характеризует степень нагретости тела или его тепловое состояние, проявляемое в интенсивности теплового движения микрочастиц.

На практике температуру обычно измеряют по международной практической температурной шкале в градусах Цельсия (t , °C). При этом *параметром состояния* является **термодинамическая температура**, измеряемая по термодинамической (абсолютной) шкале в градусах Кельвина (T , K).

Как единицы измерения градус Кельвина (K) и градус Цельсия (°C) между собой равны, т.е. повышение температуры на 1 °C равнозначно ее повышению на 1 K. Для перевода значений температуры из одной шкалы в другую пользуются соотношениями:

$$T = t + 273,15 \text{ K}; \quad t = T - 273,15 \text{ °C}.$$

В США и ряде других стран для измерения температуры также применяют шкалу Фаренгейта (t , °F). В этой шкале температура таяния льда и температура кипения воды обозначены соответственно через 32 °F и 212 °F. Для перевода значений температуры из этой шкалы в градусы Цельсия и обратно используют соотношения:

$$t \text{ °C} = (5/9) \cdot (t \text{ °F} - 32);$$

$$t \text{ °F} = (9/5) \cdot (t \text{ °C}) + 32.$$

При переводе разности температур (Δt) из градусов Цельсия в градусы Фаренгейта и наоборот исходят только из цены деления термометров, а формулы для расчета принимают вид:

$$\Delta t \text{ °C} = (5/9) \cdot \Delta t \text{ °F};$$

$$\Delta t \text{ °F} = (9/5) \cdot \Delta t \text{ °C}.$$

1.2. ЗАДАНИЯ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ

1.1. Атмосферное давление по показаниям ртутного барометра составляет 748 мм. Выразить это давление в единицах измерения Па, кПа, МПа, бар, кгс/см², ат, атм, мм вод. ст., м вод. ст., psi.

Исходные данные для решения задачи № 1.1

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>B</i> , мм рт.ст.	737	740	743	746	749	752	755	758	761	764
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
<i>B</i> , мм рт.ст.	739	741	744	745	747	751	754	757	759	762

Решение

Для перевода единиц измерения воспользуемся таблицей 1.1:

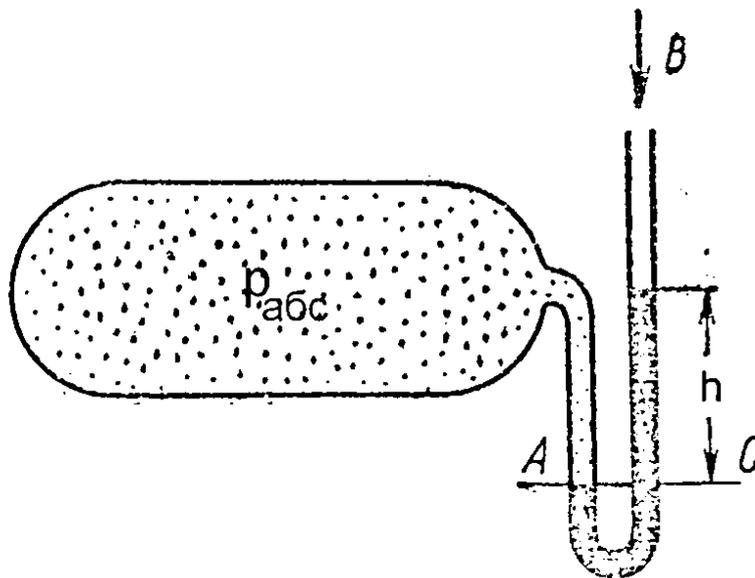
1 мм рт. ст. = 133,32 Па	→	748 мм рт.ст. · 133,32	= 99 723 Па;
1 кПа = 10 ³ Па	→	99 723 Па / 10 ³	= 99,7 кПа;
1 МПа = 10 ⁶ Па	→	99 723 Па / 10 ⁶	= 0,0997 МПа;
1 бар = 10 ⁵ Па	→	99 723 Па / 10 ⁵	= 0,997 бар;
1 кгс/см ² ≈ 98100 Па	→	99 723 Па / 98100	= 1,017 кгс/см²;
1 ат ≈ 98100 Па	→	99 723 Па / 98100	= 1,017 ат;
1 атм = 101325 Па	→	99 723 Па / 101325	= 0,984 атм;
1 мм. вод. ст. ≈ 9,81 Па	→	99 723 Па / 9,81	= 10165 мм вод. ст.;
1 м вод. ст. ≈ 9810 Па	→	99 723 Па / 9810	= 10,17 м вод. ст.;
1 psi ≈ 6895 Па	→	99 723 Па / 6895	= 14,46 psi.

Ответ: $B = 99723 \text{ Па} = 99,7 \text{ кПа} = 0,0997 \text{ МПа} = 0,997 \text{ бар} =$
 $= 1,017 \text{ кгс/см}^2 = 1,017 \text{ ат} = 0,984 \text{ атм} = 10165 \text{ мм вод. ст.} =$
 $= 10,17 \text{ м вод. ст.} = 14,46 \text{ psi.}$

1.2. Определить абсолютное давление газа в баллоне, если разность уровней ртути h в подсоединенном к нему U-образном манометре составляет 510мм, а атмосферное давление $B = 748$ мм рт.ст. Ответ представить в единицах измерения мм рт.ст., Па, ат, кгс/см², psi.

Исходные данные для решения задачи № 1.2

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
h , мм	515	520	525	530	535	540	545	550	555	560
B , мм рт.ст.	764	761	758	755	752	749	746	743	740	737
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
h , мм	505	500	495	490	485	480	475	470	465	460
B , мм рт.ст.	762	759	757	754	751	747	745	744	741	739



Решение

Превышение уровня ртути в правом колене U-образного манометра по отношению к уровню ртути в левом колене говорит о том, что в сосуде действует избыточное давление, которое "пересиливает" атмосферное.

Величина избыточного давления $p_{\text{изб}}$ определяется по показаниям манометра, т.е. по разности уровней ртути в левом и правом коленах манометра (значение h). Получаем: $h = 510 \text{ мм} \rightarrow p_{\text{изб}} = 510 \text{ мм рт.ст.}$

Воспользуемся формулой для вычисления абсолютного давления:

$$p_{\text{абс}} = B + p_{\text{изб}}.$$

$$p_{\text{абс}} = (748 + 510) \text{ мм рт.ст.} = 1258 \text{ мм рт.ст.}$$

$$p_{\text{абс}} = 1258 \text{ мм рт.ст.} \cdot 133,32 = 167\,717 \text{ Па.}$$

$$p_{\text{абс}} = 167\,717 \text{ Па} / 98\,100 = 1,71 \text{ ат} = 1,71 \text{ кгс/см}^2.$$

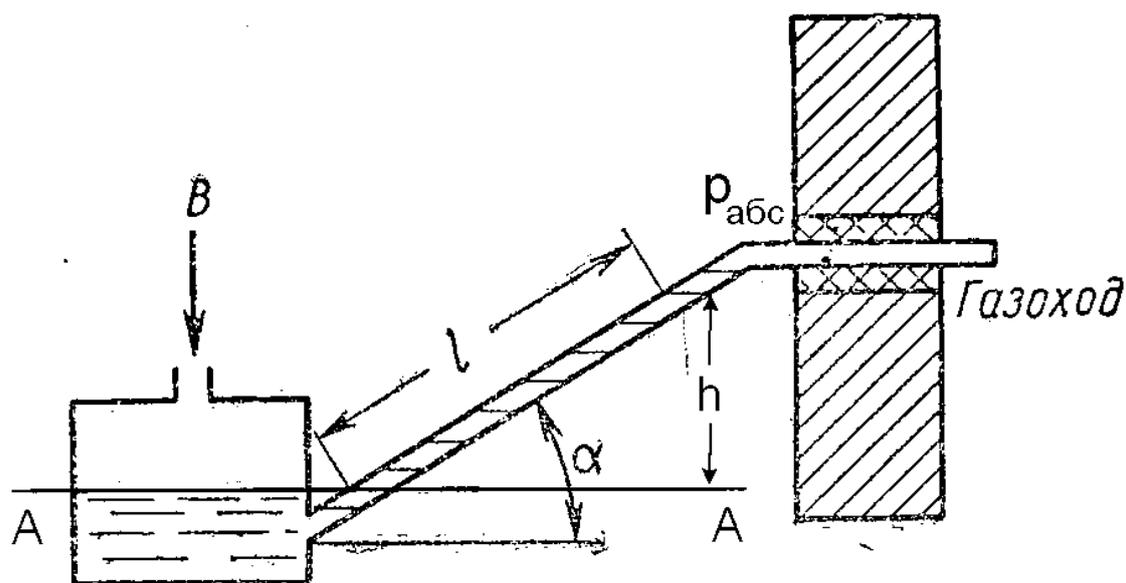
$$p_{\text{абс}} = 167\,717 \text{ Па} / 6895 = 24,3 \text{ psi.}$$

Ответ: $p_{\text{абс}} = 1258 \text{ мм рт.ст.} = 167\,717 \text{ Па} = 1,71 \text{ кгс/см}^2 = 24,3 \text{ psi.}$

1.3. Разрежение в газоходе парового котла определяется тягомером с наклонной трубкой, угол наклона которой составляет 31° . Длина столба воды $l = 170 \text{ мм}$. Определить вакуумметрическое и абсолютное давление газов, если атмосферное давление $B = 751 \text{ мм рт.ст.}$

Исходные данные для решения задачи № 1.3

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\alpha, ^\circ$	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
$l, \text{ мм}$	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$\alpha, ^\circ$	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51
$l, \text{ мм}$	150	155	160	165	175	180	185	190	195	200



Решение

Проведем условную линию А-А и рассмотрим действие давлений в тягомере, возникающих выше данной линии.

Слева действует атмосферное давление B . Оно уравновешивается двумя давлениями, действующими справа – давлением столба жидкости высотой h и абсолютным давлением газов $p_{абс}$, которое ниже атмосферного. Его величину вычислим по формуле:

$$p_{абс} = B - p_{вак}. \quad (1)$$

Значение вакуумметрического давления $p_{вак}$ определим на основании показаний тягомера (который по сути является чашечным вакуумметром) по формуле:

$$p_{вак} = \rho_B \cdot g \cdot h_B. \quad (2)$$

Здесь следует отметить, что при определении высоты столба жидкости не имеет значения форма емкости (вертикальная, наклонная, изогнутая и т.д.), в которой находится эта жидкость. Данная высота определяется длиной перпендикуляра, опущенного из верхней точки столба жидкости к точке, в которой вычисляется давление. В нашем случае это значение h , т.е. $h_B = h$.

Чтобы вычислить значение h , воспользуемся определением синуса (на рисунке h – катет, l – гипотенуза):

$$\sin \alpha = \frac{h}{l} \rightarrow h = l \cdot \sin \alpha . \quad (3)$$

$$h = 170 \text{ мм} \cdot 0,52 = 88,4 \text{ мм} = 0,088 \text{ м}.$$

Подставим полученное значение h в формулу (2):

$$p_{\text{вак}} = 1000 \text{ кг/м}^3 \cdot 9,81 \text{ м/с}^2 \cdot 0,088 \text{ м} = 863 \text{ Па}.$$

Определим по формуле (1) абсолютное давление:

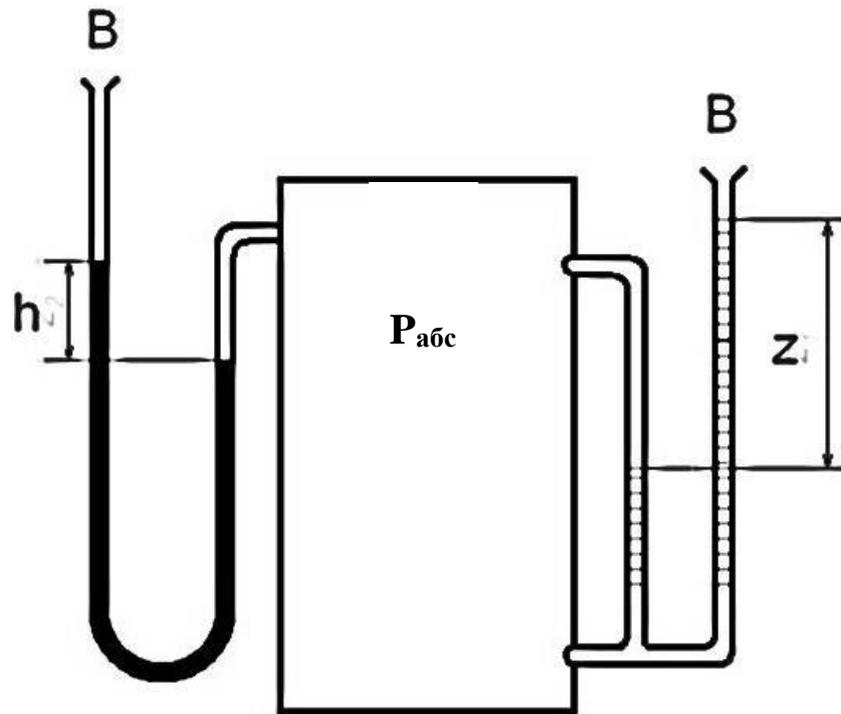
$$p_{\text{абс}} = 751 \cdot 133,32 \text{ Па} - 863,3 \text{ Па} = 99\,260 \text{ Па}.$$

Ответ: $p_{\text{вак}} = 863 \text{ Па}$; $p_{\text{абс}} = 99\,260 \text{ Па}$.

1.4. Определить абсолютное и избыточное давление в котле с водой и пьезометрическую высоту z , если разница уровней ртути в коленах U-образного манометра $h = 50$ мм. Атмосферное давление $B = 756$ мм рт.ст. Плотность воды $\rho_{\text{в}} = 1000 \text{ кг/м}^3$, плотность ртути $\rho_{\text{рт}} = 13600 \text{ кг/м}^3$. Ответ представить в единицах измерения кгс/см².

Исходные данные для решения задачи № 1.4

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
B , мм рт.ст.	741	742	743	744	745	746	747	748	749	750
h , мм	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
B , мм рт.ст.	751	752	753	754	755	757	758	759	760	761
h , мм	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150



Решение

Представим, что в котле действует давление, равное атмосферному, т.е. $p_{абс} = B$. В этом случае из-за отсутствия перепада давлений по закону сообщающихся сосудов уровни жидкостей займут одинаковое положение, т.е. значения параметров h и z окажутся равными нулю.

По условию задачи имеется перепад высот уровней жидкостей, т.е. действующее в котле давление $p_{абс}$ "пересиливает" действующее на жидкость со стороны манометра (слева) и со стороны пьезометра (справа) атмосферное давление B . Это говорит о наличии в котле избыточного давления. Оно определяется по показаниям жидкостного манометра:

$$p_{изб} = \rho_{рт} \cdot g \cdot h.$$

$$p_{изб} = 13600 \cdot 9,81 \cdot 0,05 \text{ Па} = 6671 \text{ Па} = 0,068 \text{ кгс/см}^2.$$

Действующее в котле абсолютное давление вычислим по формуле:

$$p_{абс} = B + p_{изб}.$$

$$p_{абс} = 756 \cdot 133,32 \text{ Па} + 6671 \text{ Па} = 107461 \text{ Па} = 1,095 \text{ кгс/см}^2.$$

Определим значение пьезометрической высоты z . Отличие пьезометра от жидкостного манометра заключается в том, что величина действующего избыточного давления в системе (в данном примере в котле) определяется по разности уровней жидкости в котле и в пьезометре (в данном примере это величина z). Поскольку подключенные к котлу манометр и пьезометр измеряют одно и то же давление в котле, их показания должны совпадать. Тогда:

$$\rho_{рт} \cdot g \cdot h = \rho_{в} \cdot g \cdot z \implies z = h \cdot (\rho_{рт} / \rho_{в}).$$

$$z = 0,05 \text{ м} \cdot (13600 / 1000) = 0,68 \text{ м}.$$

Полученные данные говорят о том, что столб ртути высотой 0,05 м и столб воды высотой 0,68 м (в 13,6 раза выше столба ртути) создают одинаковое давление, поскольку плотность воды в 13,6 раза меньше плотности ртути.

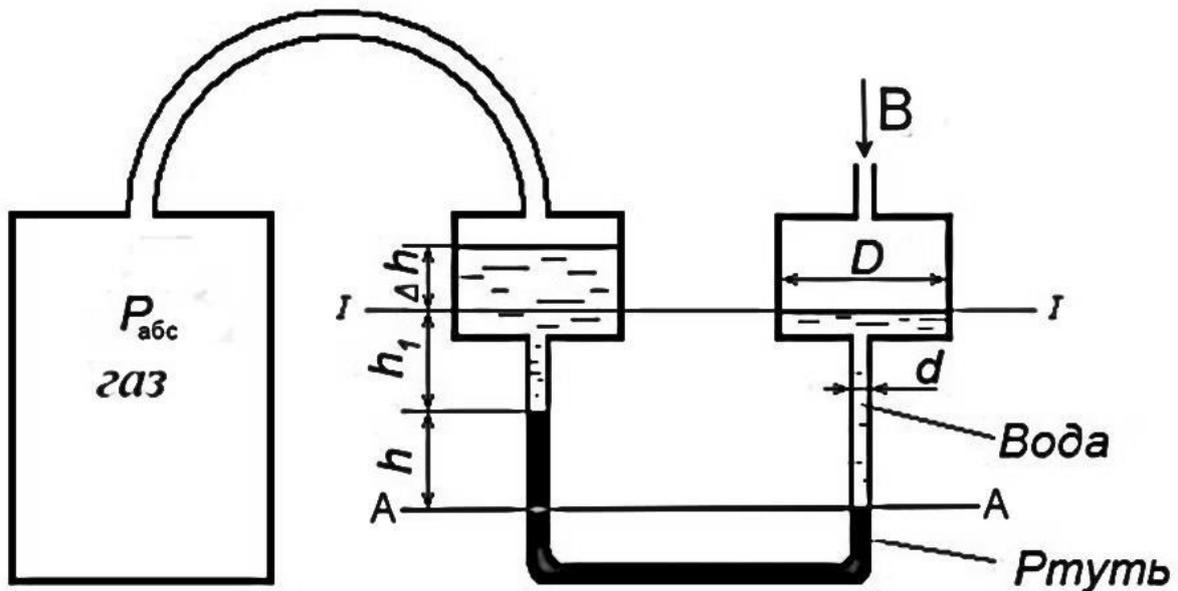
Ответ: $p_{абс} = 1,095 \text{ кгс/см}^2$; $p_{изб} = 0,068 \text{ кгс/см}^2$; $z = 0,68 \text{ м}$.

1.5. Для измерения давления газа в баллоне применен двухжидкостный чашечный манометр, диаметры чашечек которого одинаковы и равны D , а диаметр трубок – d . Манометр заполнен ртутью ($\rho_{рт} = 13600 \text{ кг/м}^3$) и водой ($\rho_{в} = 1000 \text{ кг/м}^3$), объем которой одинаков в левой и правой частях манометра. Определить абсолютное и вакуумметрическое давление, если разность уровней ртути $h = 20 \text{ см}$, отношение $d / D = 0,1$, атмосферное давление $B = 750 \text{ мм рт.ст.}$. Ответ представить в единицах измерения кПа.

Исходные данные для решения задачи № 1.5

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d / D	0,05	0,055	0,06	0,065	0,07	0,075	0,08	0,085	0,09	0,095
$h, \text{ см}$	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
$B, \text{ мм рт.ст.}$	741	742	743	744	745	746	747	748	749	751

Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
d/D	0,105	0,11	0,115	0,12	0,125	0,13	0,135	0,14	0,145	0,15
h , см	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120
B , мм рт.ст.	752	753	754	755	756	757	758	759	760	761



Решение

Представим, что давление газа в сосуде будет равно атмосферному. Тогда столбы жидкостей в левой и правой частях манометра займут одинаковые положения, т.е. уровни ртути в левой и в правой частях манометра будут совпадать. Так же будут совпадать и уровни воды.

Поскольку в условии задачи в левой части манометра уровень жидкости выше, чем в правой, получается, что атмосферное давление B "пересиливает" давление $p_{абс}$, действующее со стороны сосуда, т.е. в сосуде создается разрежение (давление ниже атмосферного). При этом в рассматриваемых условиях представленное устройство работает как жидкостный вакуумметр, и по его показаниям мы определяем величину вакуумметрического давления. В том случае, если бы давление $p_{абс}$, действующее в сосуде, превышало атмосферное, данный прибор работал бы как манометр, т.е. показывал бы величину избыточного давления.

Для вычисления вакуумметрического давления воспользуемся формулой:

$$p_{\text{абс}} = B - p_{\text{вак}} \implies p_{\text{вак}} = B - p_{\text{абс}}. \quad (1)$$

Для того, чтобы вычислить значение $p_{\text{абс}}$, проведем условную линию $A-A$. Поскольку система находится в равновесии, давления в точках пересечения линии $A-A$ с частями вакуумметра будут одинаковыми. Обозначим их как p_A . Столбы ртути, расположенные ниже линии $A-A$, не рассматриваются, поскольку они уравновешивают друг друга, и при записи в математическом виде создаваемые ими давления взаимно сокращаются.

В левой части вакуумметра давление p_A определяется как сумма трех давлений: давления $p_{\text{абс}}$, давления столба ртути высотой h , давления столба воды высотой $(h_1 + \Delta h)$:

$$p_A = p_{\text{абс}} + \rho_{\text{рт}} \cdot g \cdot h + \rho_{\text{в}} \cdot g \cdot (h_1 + \Delta h).$$

В правой части давление p_A определяется как сумма двух давлений: атмосферного давления B и давления столба воды высотой $(h + h_1)$:

$$p_A = B + \rho_{\text{в}} \cdot g \cdot (h + h_1).$$

Приравняем правые стороны этих выражений:

$$p_{\text{абс}} + \rho_{\text{в}} \cdot g \cdot (h_1 + \Delta h) + \rho_{\text{рт}} \cdot g \cdot h = B + \rho_{\text{в}} \cdot g \cdot (h + h_1).$$

Раскроем скобки, сократим обе части выражения на $\rho_{\text{в}} \cdot g \cdot h_1$ и выразим $p_{\text{абс}}$:

$$p_{\text{абс}} = B + \rho_{\text{в}} \cdot g \cdot h - \rho_{\text{в}} \cdot g \cdot \Delta h - \rho_{\text{рт}} \cdot g \cdot h. \quad (2)$$

Величину Δh определим из условия равенства объемов воды в левой и правой частях вакуумметра. При этом объем столба ртути высотой h равен объему столба воды высотой Δh :

$$h \cdot (\pi \cdot d^2 / 4) = \Delta h \cdot (\pi \cdot D^2 / 4) \implies \Delta h = h \cdot (d/D)^2.$$

$$\Delta h = 0,2 \text{ м} \cdot 0,1^2 = 0,002 \text{ м}.$$

Подставляя вычисленное значение Δh в формулу (2), получаем:

$$p_{\text{абс}} = 750 \cdot 133,32 \text{ Па} + 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,2 \text{ Па} - 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,002 \text{ Па} - 13600 \cdot 9,81 \cdot 0,2 \text{ Па}.$$

$$p_{\text{абс}} = 75\,249 \text{ Па} = 75,3 \text{ кПа.}$$

Величину вакуумметрического давления определим по формуле (1):

$$p_{\text{вак}} = 750 \cdot 133,32 \text{ Па} - 75\,249 \text{ Па} = 24\,741 \text{ Па} = 24,7 \text{ кПа.}$$

Ответ: $p_{\text{абс}} = 75,3 \text{ кПа}$, $p_{\text{вак}} = 24,7 \text{ кПа}$.

1.6. Выразить температуру абсолютного нуля в градусах Фаренгейта.

Ответ представить в единицах измерения К, °С и °F.

Решение

Температура абсолютного нуля по термодинамической (абсолютной) шкале равна 0 К. Переведем эту температуру в градусы Цельсия, воспользовавшись соотношением:

$$t = T - 273,15 \text{ °С};$$

$$t = 0 - 273 = -273 \text{ °С.}$$

Выразим эту температуру в градусах Фаренгейта по формуле:

$$t \text{ °F} = (9/5) \cdot (t \text{ °С}) + 32;$$

$$t = (9/5) \cdot (-273 \text{ °С}) + 32 = -459 \text{ °F.}$$

Ответ: $t = 0 \text{ К} = -273 \text{ °С} = -459 \text{ °F}$.

1.3. ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1.7. Определить абсолютное давление пара в котле, если по показаниям манометра давление составляет 1,3 бар, а атмосферное давление по показаниям барометра – 752 мм рт.ст. Ответ представить в единицах измерения Па, мм рт.ст., кПа, бар, МПа.

Исходные данные для решения задачи № 1.7

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p_{\text{изб}}$, бар	1,5	1,5	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4
B , мм рт.ст.	758	745	754	761	752	753	759	747	757	760
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$p_{\text{изб}}$, бар	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4
B , мм рт.ст.	743	749	744	741	742	750	746	751	748	755

Решение

Запишем формулу для вычисления абсолютного давления по показаниям манометра:

$$p_{\text{абс}} = B + p_{\text{изб}}.$$

Чтобы воспользоваться данной формулой, необходимо получить одинаковые единицы измерения, например, паскали (Па):

$$p_{\text{изб}} = 1,3 \text{ бар} \cdot 10^5 = 130\,000 \text{ Па};$$

$$B = 752 \text{ мм рт.ст.} \cdot 133,32 = 100\,257 \text{ Па.}$$

Получаем:

$$p_{\text{абс}} = 130\,000 \text{ Па} + 100\,257 \text{ Па} = 230\,257 \text{ Па.}$$

$$p_{\text{абс}} = 230\,257 \text{ Па} / 133,32 = 1727,1 \text{ мм рт.ст.}$$

$$p_{\text{абс}} = 230\,257 \text{ Па} / 1000 = 230,3 \text{ кПа.}$$

$$p_{\text{абс}} = 230\,257 \text{ Па} / 100\,000 = 2,3 \text{ бар.}$$

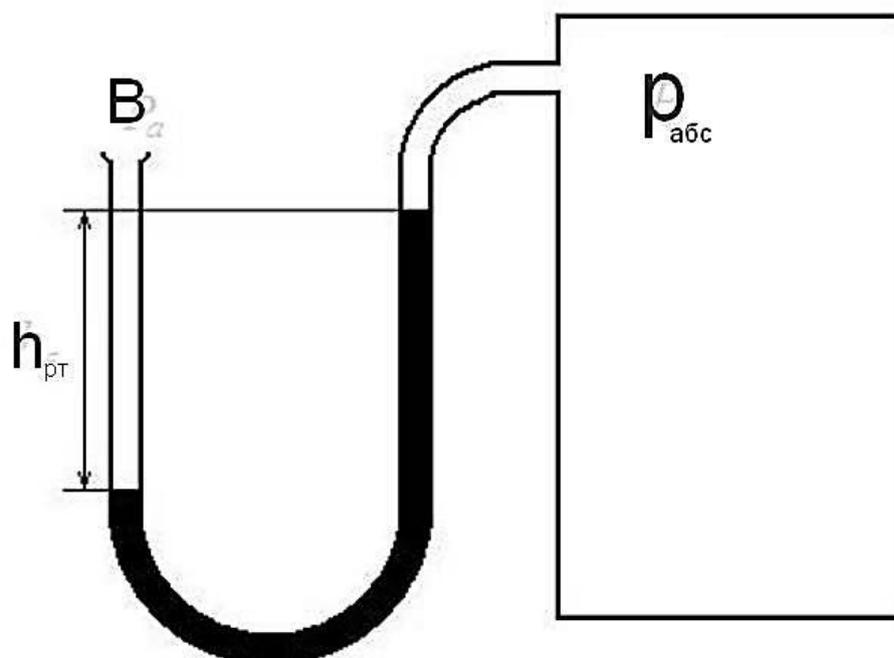
$$p_{\text{абс}} = 230\,257 \text{ Па} / 1\,000\,000 = 0,23 \text{ МПа.}$$

Ответ: $p_{\text{абс}} = 230\,257 \text{ Па} = 1727,1 \text{ мм рт.ст.} = 230,3 \text{ кПа} = 2,3 \text{ бар} = 0,23 \text{ МПа.}$

1.8. В ртутном вакуумметре, подключенном к камере конденсатора паровой машины, столб ртути в правом колене выше, чем в левом, на 600 мм. Атмосферное давление по показаниям барометра $B = 755 \text{ мм рт.ст.}$ Определить величину разрежения и абсолютное давление в конденсаторе. Ответ представить в единицах измерения кПа, бар и МПа.

Исходные данные для решения задачи № 1.8

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$h_{\text{рт}}, \text{ м}$	500	510	520	530	540	550	560	570	580	590
$B, \text{ м}$	752	753	754	755	756	757	758	759	760	761
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$h_{\text{рт}}, \text{ м}$	400	410	420	430	440	450	460	470	480	490
$B, \text{ м}$	741	742	743	744	745	746	747	748	749	751



Решение

По положению ртути в трубках (коленах) вакуумметра можно сделать вывод о том, что в конденсаторе действует пониженное давление (разряжение), т.е. атмосферное давление B "пересиливает" действующее в конденсаторе давление $p_{абс}$.

Величину разряжения (вакуумметрическое давление) на основании показаний вакуумметра вычислим по формуле:

$$p_{\text{вак}} = \rho_{\text{рт}} \cdot g \cdot h_{\text{рт}} = (13600 \cdot 9,81 \cdot 0,6) \text{ Па} = 80\,050 \text{ Па.}$$

$$p_{\text{вак}} = 80\,050 \text{ Па} = 80,05 \text{ кПа} = 0,8 \text{ бар} = 0,08 \text{ МПа.}$$

Определим действующее в конденсаторе абсолютное давление:

$$p_{\text{абс}} = B - p_{\text{вак}} = (755 - 600) \text{ мм рт.ст.} \cdot 133,32 = 20\,665 \text{ Па.}$$

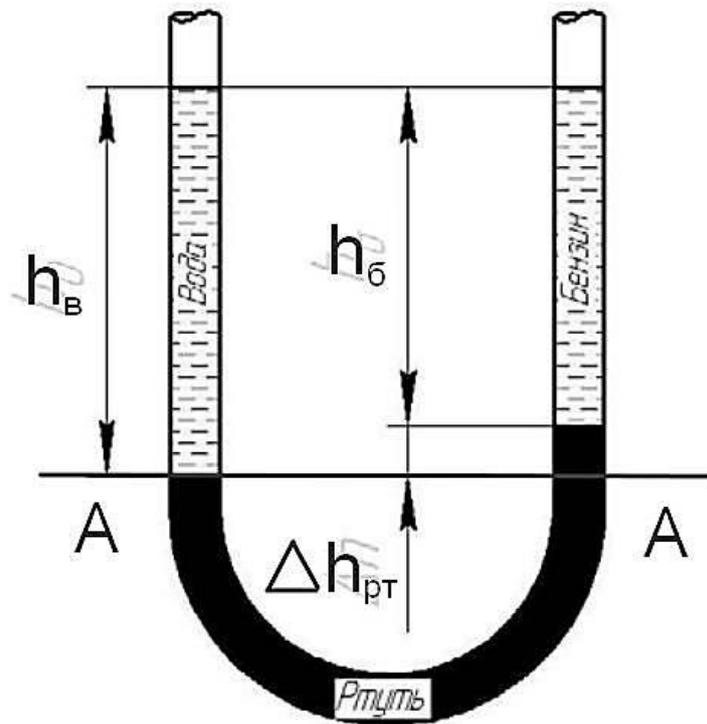
$$p_{\text{абс}} = 20\,665 \text{ Па} = 20,67 \text{ кПа} = 0,21 \text{ бар} = 0,02 \text{ МПа.}$$

Ответ: $p_{\text{абс}} = 20,67 \text{ кПа} = 0,21 \text{ бар} = 0,02 \text{ МПа}$; $p_{\text{вак}} = 80,05 \text{ кПа} = 0,8 \text{ бар} = 0,08 \text{ МПа}$.

1.9. В U-образную трубку с находящейся в ней ртутью в одно колено налили воду, а в другое – бензин. При совпадении верхних уровней воды и бензина высота столба воды составила $h_{\text{в}} = 43$ см. Определить разность уровней ртути. Плотность воды $\rho_{\text{в}} = 1000 \text{ кг/м}^3$, плотность ртути $\rho_{\text{рт}} = 13600 \text{ кг/м}^3$, плотность бензина $\rho_{\text{б}} = 700 \text{ кг/м}^3$.

Исходные данные для решения задачи № 1.9

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$h_{\text{в}}$, см	25	41	34	82	28	15	16	52	64	12
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$h_{\text{в}}$, см	17	27	46	61	22	37	54	31	19	48



Решение

Поскольку уровни жидкостей в левом и правом коленах U-образной трубки находятся в равновесии, создаваемые этими жидкостями давления равны. В противном случае произошло бы движение жидкостей из области действия высокого давления в область действия низкого.

Проведем условную линию *A-A* и запишем составляющие давлений, действующих в точках пересечения линии *A-A* с коленами U-образной трубки. В данном случае действие атмосферного давления не рассматривается, поскольку оно действует одинаково в обоих коленах трубки. Также не учитываются давления, создаваемые расположенными ниже линии *A-A* столбами ртути, поскольку они равны и компенсируют друг друга.

В левом колене давление создается столбом жидкости (воды) высотой h_B и численно равно произведению $\rho_B \cdot g \cdot h_B$.

В правом колене давление создается двумя столбами жидкостей (ртути и бензина) и численно равно сумме произведений $\rho_B \cdot g \cdot h_Б$ и $\rho_{рт} \cdot g \cdot \Delta h_{рт}$.

Из условия равенства этих давлений получаем:

$$\rho_B \cdot g \cdot h_B = \rho_6 \cdot g \cdot h_6 + \rho_{рт} \cdot g \cdot \Delta h_{рт}.$$

Сократив обе части выражения на величину g и подставив вместо h_6 разность $h_B - \Delta h_{рт}$, получим:

$$\rho_B \cdot h_B = \rho_6 \cdot h_B - \rho_6 \cdot \Delta h_{рт} + \rho_{рт} \cdot \Delta h_{рт}.$$

Выразим $\Delta h_{рт}$:

$$\Delta h_{рт} \cdot (\rho_{рт} - \rho_6) = \rho_B \cdot h_B - \rho_6 \cdot h_B;$$

$$\Delta h_{рт} = h_B \cdot \frac{\rho_B - \rho_6}{\rho_{рт} - \rho_6};$$

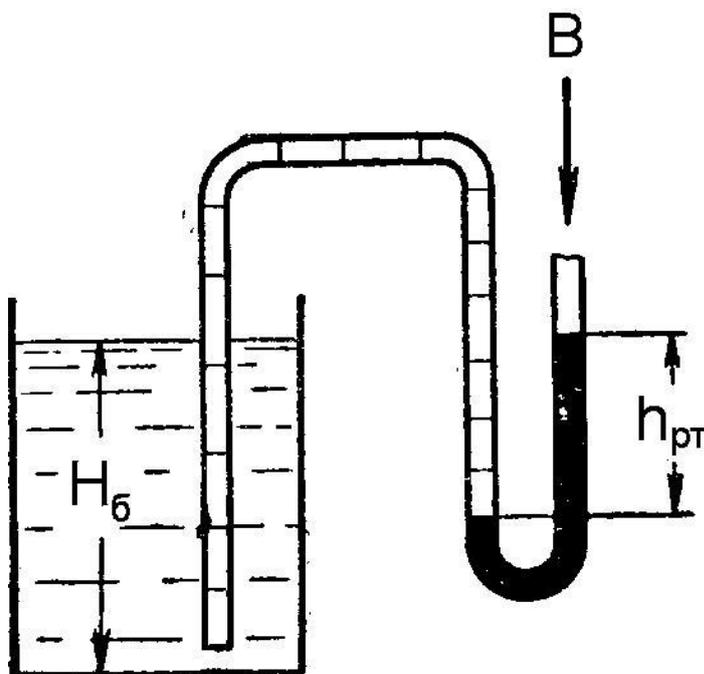
$$\Delta h_{рт} = 0,43 \cdot \frac{1000 - 700}{13600 - 700} = \frac{129}{12900} = 0,01 \text{ м.}$$

Ответ: $\Delta h_{рт} = 0,01 \text{ м.}$

1.10. Высота уровня жидкости в емкости измеряется с помощью устройства, изображенного на рисунке. Определить уровень бензина H_6 в емкости, если $h_{рт} = 340$ мм. Плотность бензина принять равной 845 кг/м^3 , плотность ртути – равной $13\,550 \text{ кг/м}^3$.

Исходные данные для решения задачи № 1.10

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$h_{рт}$, мм	25	41	34	82	28	15	16	52	64	12
Жидкость в емкости	Бензин		Мазут		Керосин			Дизельное топливо		
ρ , кг/м ³	840	850	940	945	815	820	825	875	880	885
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$h_{рт}$, мм	14	67	54	19	21	24	76	38	47	29
Жидкость в емкости	Бензин		Мазут		Керосин			Дизельное топливо		
ρ , кг/м ³	840	850	940	945	815	820	825	875	880	885



Решение

Представим, что прибор находится в таком положении, при котором его левая часть располагается над самой поверхностью жидкости (бензина). В этом случае на ртуть с обеих сторон будет действовать атмосферное давление B , а ее уровни в обоих коленах прибора будут одинаковыми.

При дальнейшем погружении прибора в емкость с бензином с левой стороны в дополнение к атмосферному давлению B начнет действовать избыточное давление столба бензина. Это приведет к перемещению ртути из области повышенного давления (из левого колена) в область пониженного (в правое колено). Таким образом, возникающее избыточное давление, создаваемое столбом бензина высотой H_6 , будет компенсироваться давлением, создаваемым столбом ртути высотой $h_{рт}$:

$$\rho_6 \cdot g \cdot H_6 = \rho_{рт} \cdot g \cdot h_{рт} \quad \rightarrow \quad H_6 = h_{рт} \cdot \frac{\rho_{рт}}{\rho_6}.$$

$$H_6 = 340 \text{ мм} \cdot \frac{13550}{845} = 5452 \text{ мм} = 5,45 \text{ м}.$$

Ответ: $H_6 = 5,45 \text{ м}.$

1.11. Температура насыщенного пара в камере парогенератора равна 340°C при давлении 146 бар. После прохождения пара через пароперегреватель его температура повысилась на 210°C. Выразить начальную и конечную температуру и изменение температуры в единицах измерения К, °С и °F.

Исходные данные для решения задачи № 1.11

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_n, ^\circ\text{C}$	280	285	290	295	300	305	310	315	320	325
$\Delta t, ^\circ\text{C}$	260	255	250	245	240	235	230	225	220	215
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$t_n, ^\circ\text{C}$	330	345	350	355	360	365	370	375	380	385
$\Delta t, ^\circ\text{C}$	205	200	195	190	185	180	175	170	165	160

Решение

Обозначим температуру насыщенного пара t_n , температуру перегретого пара – t_p . Для перевода значений в градусы Фаренгейта воспользуемся соотношением:

$$t \text{ } ^\circ\text{F} = (9/5) \cdot (t \text{ } ^\circ\text{C}) + 32.$$

$$t_n = (9/5) \cdot (340 \text{ } ^\circ\text{C}) + 32 = 644 \text{ } ^\circ\text{F}.$$

$$t_p = (9/5) \cdot (550 \text{ } ^\circ\text{C}) + 32 = 1022 \text{ } ^\circ\text{F}.$$

$$\Delta t = 1022 \text{ } ^\circ\text{F} - 644 \text{ } ^\circ\text{F} = 378 \text{ } ^\circ\text{F}.$$

Это же значение $\Delta t = 378 \text{ } ^\circ\text{F}$ можно получить по формуле:

$$\Delta t \text{ } ^\circ\text{F} = (9/5) \cdot \Delta t \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$\Delta t = (9/5) \cdot 210 \text{ } ^\circ\text{C} = 378 \text{ } ^\circ\text{F}.$$

Переведем значения температур в градусы Кельвина по формуле:

$$T \text{ (K)} = t \text{ (} ^\circ\text{C)} + 273.$$

$$T_n = 340 \text{ } ^\circ\text{C} + 273 = 613 \text{ K}.$$

$$T_p = 550 \text{ } ^\circ\text{C} + 273 = 823 \text{ K}.$$

$$\Delta T = 823 \text{ K} - 613 \text{ K} = 210 \text{ K}.$$

Ответ: $t_{\text{н}} = 340 \text{ }^{\circ}\text{C} = 644 \text{ }^{\circ}\text{F} = 613 \text{ K};$

$$t_{\text{п}} = 550 \text{ }^{\circ}\text{C} = 1022 \text{ }^{\circ}\text{F} = 823 \text{ K};$$

$$\Delta t = 210 \text{ }^{\circ}\text{C} = 378 \text{ }^{\circ}\text{F} = 210 \text{ K}.$$

1.12. По международной практической температурной шкале температура кипения воды при нормальном атмосферном давлении $t_{\text{к}} = 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$, температура замерзания воды $t_{\text{з}} = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Выразить эти значения в градусах Фаренгейта и градусах Кельвина.

Решение

Приведем значения температур в соответствие шкале Фаренгейта:

$$t_{\text{к}} = (9/5) \cdot (100 \text{ }^{\circ}\text{C}) + 32 = 212 \text{ }^{\circ}\text{F};$$

$$t_{\text{з}} = (9/5) \cdot (0 \text{ }^{\circ}\text{C}) + 32 = 32 \text{ }^{\circ}\text{F}.$$

Приведем значения температур в соответствие абсолютной шкале:

$$T_{\text{к}} = 100 \text{ }^{\circ}\text{C} + 273 = 373 \text{ K};$$

$$T_{\text{з}} = 0 \text{ }^{\circ}\text{C} + 273 = 273 \text{ K}.$$

Ответ: $t_{\text{з}} = 0 \text{ }^{\circ}\text{C} = 32 \text{ }^{\circ}\text{F} = 273 \text{ K}.$

$$t_{\text{к}} = 100 \text{ }^{\circ}\text{C} = 212 \text{ }^{\circ}\text{F} = 373 \text{ K}.$$

РАЗДЕЛ 2. ИДЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ И ОСНОВНЫЕ ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

2.1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Под *идеальным газом* понимают абстрактную модель газа, в котором отсутствуют силы взаимодействия между молекулами, а собственный объем молекул исчезающе мал по сравнению с объемом межмолекулярного пространства (молекулы принимаются за материальные точки, имеющие массу, но не имеющие объема).

В природе не существует идеальных газов, однако в теплотехнических расчетах допустимо считать идеальными все газы (He, H₂, N₂, O₂ и т.д.).

В тех газах, которые находятся в состояниях, достаточно близких к сжижению, нельзя пренебречь силами притяжения между молекулами и их объемом. Такие газы нельзя отнести к идеальным, и их называют *реальными газами* (например, водяной пар, являющийся рабочим телом в паровых двигателях или теплоносителем в различных теплообменных аппаратах).

Основное уравнение кинетической теории газов имеет следующий вид:

$$p = \frac{2}{3} n \frac{m \bar{\omega}^2}{2},$$

где

p – давление идеального газа;

n – число молекул, заключенных в единице объема (концентрация);

m – масса одной молекулы;

$\bar{\omega}$ – средняя квадратичная скорость движения молекул.

С помощью основного уравнения кинетической теории получены основные законы для идеальных газов.

При постоянной температуре ($T = const$) давление p и удельный объем v (или объем V) связаны соотношением (закон Бойля-Мариотта):

$$pv = const \text{ или } pV = const .$$

При постоянном давлении ($p = const$) соотношение между удельным объемом (или объемом V) и температурой подчиняется закону Гей-Люссака:

$$\frac{v}{T} = const .$$

При постоянном объеме ($v = const$ или $V = const$) давление и температура связаны соотношением (закон Шарля):

$$\frac{p}{T} = const .$$

Основные параметры состояния (p , v и T) связаны между собой соотношениями, которые называются **характеристическими уравнениями состояния газа (уравнения состояния)** и имеют следующий вид:

уравнение Клапейрона для газа заданной массы m

$$pV = mRT$$

или для 1 кг газа

$$pv = RT;$$

уравнение Менделеева – Клапейрона

$$pV_{\mu} = \bar{R}T.$$

В данных выражениях:

p – абсолютное давление, Па;

V – объем газа, м³;

m – масса газа, кг;

R – газовая постоянная, Дж/(кг·К);

T – термодинамическая температура, К;

v – удельный объем, м³/кг;

V_{μ} – объем одного киломоля газа, м³/кмоль;

\bar{R} – универсальная газовая постоянная, $\bar{R} = 8314$ Дж/(кмоль·К).

Если в уравнении Клапейрона все переменные параметры перенести в левую часть, а постоянные – в правую, можно получить выражения для вычисления любого параметра при переходе от одного состояния к другому, если значения остальных параметров известны:

$$\frac{pV}{T} = mR = \text{const} \quad \text{или} \quad \frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2};$$

$$\frac{pv}{T} = R = \text{const} \quad \text{или} \quad \frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{T_2}.$$

Газовая постоянная R для соответствующего газа находится по формуле:

$$R = \frac{\bar{R}}{\mu} = \frac{8314}{\mu},$$

где μ – молекулярная масса газа, кг/кмоль.

В таблице 2.1 представлены молекулярные массы, плотности при нормальных условиях и газовые постоянные важнейших газов.

Таблица 2.1 – Характеристики важнейших газов

Вещество	Химическое обозначение	Молекулярная масса μ , кг/кмоль	Плотность ρ , кг/м ³	Газовая постоянная R , Дж / (кг · К)
Воздух	–	28,96	1,293	287,0
Кислород	O ₂	32,00	1,429	259,8
Азот	N ₂	28,026	1,251	296,8
Гелий	He	4,003	0,179	2078,0
Аргон	Ar	39,994	1,783	208,2
Водород	H ₂	2,016	0,090	4124,0
Окись углерода	CO	28,01	1,250	296,8
Двуокись углерода	CO ₂	44,01	1,977	188,9
Сернистый газ	SO ₂	64,06	2,926	129,8
Метан	CH ₄	16,032	0,717	518,8
Этилен	C ₂ H ₄	28,052	1,251	296,6
Коксовый газ	–	11,50	0,515	721,0
Аммиак	NH ₃	17,032	0,771	488,3

2.2. ЗАДАНИЯ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ

2.1. Чему равен объем 1 кг азота при температуре $t = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ и избыточном давлении $p_{\text{изб}} = 0,1 \text{ МН/м}^2$. Значение атмосферного давления $B = 1 \text{ бар}$.

Исходные данные для решения задачи № 2.1

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Вещество	O ₂	He	H ₂	Ar	NH ₃	C ₂ H ₄	CO ₂	Воздух	SO ₂	CO
$t, \text{ }^\circ\text{C}$	18	45	34	62	-13	138	75	-18	29	155
$p_{\text{изб}}, \text{ МПа}$	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Вещество	O ₂	He	H ₂	Ar	NH ₃	C ₂ H ₄	CO ₂	Воздух	SO ₂	CO
$t, \text{ }^\circ\text{C}$	162	25	52	41	69	-7	145	82	-11	36
$p_{\text{изб}}, \text{ МПа}$	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30

Решение

Объем 1 кг вещества является удельным объемом v . Запишем уравнение состояния для 1 кг газа и выразим удельный объем:

$$pv = RT \rightarrow v = \frac{RT}{p} \quad (1)$$

Вычислим абсолютное давление p

$$p = B + p_{\text{изб}} = 1 \cdot 10^5 \text{ Па} + 0,1 \cdot 10^6 \text{ Па} = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

и подставим его в формулу (1):

$$v = \frac{296,8 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot (70 + 273) \text{ К}}{2 \cdot 10^5 \text{ Па}} = 0,51 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

Проверим правильность вычислений через запись единиц измерения, приняв во внимание, что $\text{Дж} = \text{Н} \cdot \text{м}$, $\text{Па} = \text{Н/м}^2$:

$$\frac{\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot \text{К}}{\text{Па}} = \frac{\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{кг}}}{\frac{\text{Н}}{\text{м}^2}} = \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

Умножив найденное значение v на массу азота, получим его объем:

$$V = v \cdot m = 0,51 \text{ м}^3/\text{кг} \cdot 1 \text{ кг} = 0,51 \text{ м}^3.$$

Ответ: $V = 0,51 \text{ м}^3$.

2.2. Чему равна плотность воздуха при избыточном давлении 2 бар и 15 бар, если температура воздуха составляет 20 °С, а атмосферное давление – 745 мм рт.ст. Сравнить полученные значения плотности воздуха с его плотностью при нормальных условиях ($B = 760 \text{ мм рт.ст.}, t = 0 \text{ °С}$).

Исходные данные для решения задачи № 2.2

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Вещество	CO ₂	C ₂ H ₄	He	O ₂	CO	NH ₃	H ₂	Ar	SO ₂	Воздух
$t, \text{ °С}$	73	28	45	61	112	-11	19	7	48	-23
$B, \text{ мм рт.ст.}$	735	738	741	744	747	750	753	756	759	762
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Вещество	CO ₂	C ₂ H ₄	He	O ₂	CO	NH ₃	H ₂	Ar	SO ₂	Воздух
$t, \text{ °С}$	69	24	41	57	108	-15	15	3	44	-27
$B, \text{ мм рт.ст.}$	737	740	743	746	749	752	755	758	761	764

Решение

Запишем уравнение состояния для 1 кг газа:

$$pv = RT. \tag{1}$$

Поскольку $v = 1/\rho$, выражение (1) примет вид:

$$\frac{p}{\rho} = RT \rightarrow \rho = \frac{p}{RT}. \tag{2}$$

Вычислим абсолютные давления p_1 и p_2 :

$$p_1 = B + p_{\text{изб.1}} = 745 \cdot 133,32 \text{ Па} + 2 \cdot 10^5 \text{ Па} = 2,993 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

$$p_2 = B + p_{\text{изб.2}} = 745 \cdot 133,32 \text{ Па} + 15 \cdot 10^5 \text{ Па} = 15,993 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Подставим полученные значения p_1 и p_2 в формулу (2) и вычислим соответственно ρ_1 и ρ_2 :

$$\rho_1 = \frac{p_1}{RT} = \frac{2,993 \cdot 10^5 \text{ Па}}{287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 293 \text{ К}} = 3,56 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

$$\rho_2 = \frac{p_2}{RT} = \frac{15,993 \cdot 10^5 \text{ Па}}{287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 293 \text{ К}} = 19,02 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Сравним полученные значения плотностей воздуха ρ_1 и ρ_2 с его плотностью $\rho_n = 1,293 \text{ кг/м}^3$ (табл. 2.1) при нормальных условиях:

$$\frac{\rho_1}{\rho_n} = \frac{3,56}{1,293} = 2,75.$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_n} = \frac{19,02}{1,293} = 14,71.$$

Ответ: $\rho_1 = 3,56 \text{ кг/м}^3$; $\rho_2 = 19,02 \text{ кг/м}^3$; $\rho_1 / \rho_n = 2,75$; $\rho_2 / \rho_n = 14,71$.

2.3. В воздухоподогреватель парового котла вентилятором подается $130\,000 \text{ м}^3$ воздуха при температуре 30°C . Определить объемный расход воздуха на выходе из воздухоподогревателя, если его нагрев производится до температуры 400°C при постоянном давлении.

Исходные данные для решения задачи № 2.3

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$Q, 10^5 \text{ м}^3/\text{ч}$	0,9	1,0	1,1	1,2	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
$t_1, ^\circ\text{C}$	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
$t_2, ^\circ\text{C}$	470	460	450	440	430	420	410	390	380	370

Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$Q, 10^5 \text{ м}^3/\text{ч}$	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9
$t_1, ^\circ\text{C}$	26	27	28	29	31	32	33	34	35	36
$t_2, ^\circ\text{C}$	360	350	340	330	320	310	300	290	280	270

Решение

Рассмотрим процесс следующим образом: имелся объем воздуха V_1 при температуре $t_1 = 30^\circ\text{C} \rightarrow$ после прохождения воздуха через воздухонагреватель его температура возросла до значения $t_2 = 400^\circ\text{C}$ при увеличении объема до значения V_2 .

Поскольку давление в процессе постоянное ($p = \text{const}$), воспользуемся законом Гей-Люссака и выразим объем V_2 :

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \rightarrow V_2 = V_1 \cdot \frac{T_2}{T_1}$$

$$V_2 = 130\,000 \text{ м}^3 \cdot \frac{673 \text{ К}}{303 \text{ К}} = 288\,746 \text{ м}^3.$$

Таким образом, объемный расход воздуха Q_2 на выходе из воздухоподогревателя составляет $288\,746 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Ответ: $Q_2 = 288\,746 \text{ м}^3/\text{ч}$.

2.4. По трубопроводу протекает $10 \text{ м}^3/\text{с}$ кислорода при температуре 127°C и под давлением 4 бар. Определить массовый расход кислорода в час.

Исходные данные для решения задачи № 2.4

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	8	17	14	21	6	12	18	24	3	9
$t, ^\circ\text{C}$	84	52	141	63	78	112	57	89	95	107
$p, \text{ бар}$	13,8	16,2	7,9	11,5	10,1	18,0	3,2	22,6	17,5	14,3

Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	15	24	19	28	13	21	25	31	14	16
$t, \text{ }^\circ\text{C}$	75	43	132	54	69	103	48	80	86	98
$p, \text{ бар}$	11,5	13,9	5,6	9,2	7,8	15,7	14,2	20,3	15,2	12,0

Решение

При известном объемном расходе Q массовый расход G можно определить по формуле:

$$G = \rho \cdot Q. \quad (1)$$

Запишем уравнение состояния для 1 кг газа

$$p\nu = RT,$$

подставим вместо ν отношение $1/\rho$ и выразим плотность ρ :

$$\frac{p}{\rho} = RT \rightarrow \rho = \frac{p}{RT}.$$

Поскольку в условии задачи не указано атмосферное давление, значение давления 4 бар является абсолютным. Тогда

$$\rho = \frac{4 \cdot 10^5 \text{ Па}}{259,8 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 400 \text{ К}} = 3,85 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Подставим найденное значение ρ в формулу (1) и вычислим массовый расход G :

$$G = 3,85 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 10 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} = 38,5 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Учитывая, что $1 \text{ с} = 1 \text{ ч} / 3600$, выразим массовый расход в единицах измерения кг/ч:

$$G = 38,5 \frac{\text{кг}}{\text{ч}/3600} = 138\,600 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}.$$

Ответ: $G = 138\,600 \text{ кг/ч}$.

2.5. В цилиндре диаметром 60 см содержится 0,41 м³ воздуха при температуре 35 °С и давлении 2,5 бар. До какой температуры должен нагреваться (охлаждаться) воздух при постоянном давлении, чтобы движущийся без трения поршень переместился на 40 см?

Исходные данные для решения задачи № 2.5

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>d</i> , см	73	62	75	48	100	25	58	41	85	18
<i>V</i> , м ³	1,2	0,6	3,1	1,5	2,2	1,8	2,6	3,4	0,3	0,8
Δh , см	24	61	-31	32	15	-10	57	-22	9	19
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
<i>d</i> , см	79	68	81	54	106	31	64	47	91	24
<i>V</i> , м ³	1,6	1,0	3,5	1,9	2,6	2,4	3,0	3,8	0,7	1,2
Δh , см	22	59	-33	30	13	-12	55	-24	7	17

Решение

Рассмотрим процесс следующим образом: в цилиндре имелся объем воздуха $V_1 = 0,41 \text{ м}^3$ при температуре $t_1 = 35 \text{ °С}$ → произошел нагрев воздуха до температуры t_2 , при этом объем воздуха увеличился на ΔV до значения V_2 , а поршень переместился на расстояние $\Delta h = 40 \text{ см}$ (при отрицательном значении Δh происходит уменьшение объема воздуха в результате снижения его температуры).

Поскольку давление в процессе остается постоянным, для вычисления температуры T_2 воспользуемся законом Гей-Люссака:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \rightarrow T_2 = T_1 \frac{V_2}{V_1}. \quad (1)$$

Чтобы найти объем V_2 , рассчитаем изменение объема ΔV :

$$\Delta V = \pi r^2 \cdot \Delta h = 3,14 \cdot 0,3^2 \text{ м}^2 \cdot 0,4 \text{ м} = 0,113 \text{ м}^3.$$

Объем V_2 определим по формуле:

$$V_2 = V_1 + \Delta V = 0,41 \text{ м}^3 + 0,113 \text{ м}^3 = 0,523 \text{ м}^3.$$

Подставим полученное значение в формулу (1):

$$T_2 = 308 \text{ К} \cdot \frac{0,523 \text{ м}^3}{0,41 \text{ м}^3} = 393 \text{ К}; \quad t_2 = 120 \text{ }^\circ\text{С}.$$

Ответ: $T_2 = 393 \text{ К}; t_2 = 120 \text{ }^\circ\text{С}.$

2.6. Определить подъемную силу воздушного шара, наполненного водородом, если на поверхности земли его объем равен 1 м^3 при атмосферном давлении $B = 750 \text{ мм рт.ст.}$ и температуре $15 \text{ }^\circ\text{С}.$ Как изменится подъемная сила, если воздушный шар заполнить гелием?

Исходные данные для решения задачи № 2.6

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V, \text{ м}^3$	3,2	1,3	0,7	4,8	2,4	2,1	5,8	4,3	2,7	1,8
$B, \text{ мм рт.ст.}$	758	745	754	761	752	753	759	747	757	760
$t, \text{ }^\circ\text{С}$	-12	18	36	-10	16	26	-22	-4	14	19
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$V, \text{ м}^3$	5,5	3,6	3,0	7,1	4,7	4,4	8,1	6,6	5,0	4,1
$B, \text{ мм рт.ст.}$	743	749	744	741	742	754	746	751	748	755
$t, \text{ }^\circ\text{С}$	-9	21	39	-7	19	29	-19	-1	11	22

Решение

Согласно закону Архимеда, на любое тело, погруженное в жидкость или газ, действует выталкивающая (архимедова) сила, численно равная весу этой жидкости (газа) в объеме, вытесненном телом:

$$P_A = \rho g V, \quad (1)$$

где

ρ – плотность жидкости (газа), в которую погружено тело, кг/м^3 ;

g – ускорение свободного падения, м/с^2 ;

V – объем погруженной в жидкость (газ) части тела, м^3 .

Действие архимедовой силы направлено вертикально вверх.

Также на воздушный шар действует сила тяжести mg , направленная вертикально вниз.

Таким образом, величину подъемной силы, действующей на воздушный шар, определим по формуле:

$$F = P_A - mg. \quad (2)$$

Подставим полученное выражение (1) в формулу (2), а массу m запишем как произведение плотности на объем. Тогда формула (2) соответственно для водорода (H_2) и гелия (He) примет вид:

$$\begin{aligned} F_{H_2} &= gV\rho_{\text{возд.}} - gV\rho_{H_2} = gV(\rho_{\text{возд.}} - \rho_{H_2}); \\ F_{He} &= gV\rho_{\text{возд.}} - gV\rho_{He} = gV(\rho_{\text{возд.}} - \rho_{He}). \end{aligned} \quad (3)$$

Чтобы определить плотность воздуха, водорода и гелия, воспользуемся уравнением состояния для 1 кг газа:

$$\begin{aligned} pv &= RT \rightarrow \frac{p}{\rho} = RT; \\ \rho &= \frac{p}{RT}. \end{aligned} \quad (4)$$

$$\rho_{\text{возд.}} = \frac{750 \cdot 133,32 \text{ Па}}{287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 288 \text{ К}} = 1,21 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

$$\rho_{H_2} = \frac{750 \cdot 133,32 \text{ Па}}{4124 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 288 \text{ К}} = 0,084 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

$$\rho_{He} = \frac{750 \cdot 133,32 \text{ Па}}{2078 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 288 \text{ К}} = 0,167 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Подставим полученные по формуле (4) значения плотностей в формулы (3) и определим подъемные силы, действующие на воздушный шар при его заполнении соответственно водородом и гелием:

$$F_{H_2} = 9,81 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \cdot 1 \text{ м}^3 \left(1,21 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3} - 0,084 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3} \right) = 11 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \cdot \text{КГ} = 11 \text{ Н.}$$

$$F_{He} = 9,81 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \cdot 1 \text{ м}^3 \left(1,21 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3} - 0,167 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3} \right) = 10,2 \text{ Н.}$$

$$\Delta F = F_{H_2} - F_{He} = 0,8 \text{ Н.}$$

Таким образом, при заполнении шара гелием, действующая на него подъемная сила уменьшится на 0,8 Н по сравнению с вариантом заполнения воздушного шара водородом.

Ответ: $F_{H_2} = 11 \text{ Н}$; $F_{He} = 10,2 \text{ Н}$; $\Delta F = 0,8 \text{ Н}$.

2.3. ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

2.7. Определить массу O_2 в баллоне объемом 60 л при температуре $25\text{ }^\circ\text{C}$, если избыточное давление составляет 10,8 бар, а атмосферное – 745 мм рт.ст.

Исходные данные для решения задачи № 2.7

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Вещество	He	CO ₂	NH ₃	O ₂	SO ₂	H ₂	Ar	CO	Воздух	C ₂ H ₄
V, л	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
t, °C	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15
p _{изб} , бар	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0	11,5	12,0
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Вещество	He	CO ₂	NH ₃	O ₂	SO ₂	H ₂	Ar	CO	Воздух	C ₂ H ₄
V, л	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48
t, °C	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5
p _{изб} , бар	12,5	13,0	13,5	14,0	14,5	15,0	15,5	16,0	16,5	17,0

Решение

Определим абсолютное давление кислорода:

$$p = B + p_{\text{изб}} = 745 \cdot 133,32 \text{ Па} + 10,8 \cdot 10^5 \text{ Па} = 11,79 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Запишем уравнение состояния и выразим массу:

$$pV = mRT \rightarrow m = \frac{pV}{RT};$$

$$m = \frac{11,79 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 60 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3}{259,8 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot (25 + 273) \text{ К}} = 0,91 \text{ кг}.$$

Ответ: $m = 0,91 \text{ кг}$.

2.8. В цилиндре с подвижным поршнем находится $0,8 \text{ м}^3$ воздуха под избыточным давлением 4 бар. Как изменится объем воздуха при увеличении

давления в цилиндре на величину $\Delta p = 3$ бар, если температура воздуха останется постоянной. Атмосферное давление $B = 1$ бар.

Исходные данные для решения задачи № 2.8

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Вещество	He	O ₂	H ₂	NH ₃	Воздух	CO ₂	CO	SO ₂	C ₂ H ₄	Ar
$V, \text{ м}^3$	1,5	1,8	2,1	2,4	2,7	3,0	3,3	3,6	3,9	4,2
$p_{\text{изб}}, \text{ бар}$	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$\Delta p, \text{ бар}$	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Вещество	He	O ₂	H ₂	NH ₃	Воздух	CO ₂	CO	SO ₂	C ₂ H ₄	Ar
$V, \text{ м}^3$	4,5	4,8	5,1	5,4	5,7	6,0	6,3	6,6	6,9	7,2
$p_{\text{изб}}, \text{ бар}$	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
$\Delta p, \text{ бар}$	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22

Решение

Поскольку в рассматриваемом процессе температура остается постоянной (изотермический процесс), для вычисления объема V_2 можно воспользоваться законом Бойля-Мариотта:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 \rightarrow V_2 = V_1 \cdot \frac{p_1}{p_2}. \quad (1)$$

Определим абсолютное давление для двух состояний воздуха:

$$p_1 = B + p_{\text{изб}} = 1 \text{ бар} + 4 \text{ бар} = 5 \text{ бар};$$

$$p_2 = p_1 + \Delta p = 5 \text{ бар} + 3 \text{ бар} = 8 \text{ бар}.$$

Подставим полученные значения в формулу (1):

$$V_2 = 0,8 \text{ м}^3 \cdot \frac{5 \text{ бар}}{8 \text{ бар}} = 0,5 \text{ м}^3.$$

$$\Delta V = V_2 - V_1 = 0,5 \text{ м}^3 - 0,8 \text{ м}^3 = -0,3 \text{ м}^3.$$

Ответ: $V_2 = 0,5 \text{ м}^3, \Delta V = -0,3 \text{ м}^3.$

2.9. В сосуде объемом $0,5 \text{ м}^3$ находится воздух при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$ и под давлением $0,2 \text{ МПа}$ (показания манометра). Сколько воздуха необходимо удалить из сосуда, чтобы величина разрежения в нем составила 420 мм рт.ст. при неизменной температуре. Показания барометра составляют 768 мм рт.ст.

Исходные данные для решения задачи № 2.9

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V, \text{ л}$	150	200	250	300	350	400	450	550	600	650
$p_{\text{изб}}, \text{ бар}$	9	8,5	8,0	7,5	7,0	6,5	6,0	5,5	5,0	4,5
$t, \text{ }^\circ\text{C}$	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$p_{\text{вак}}, \text{ кПа}$	18	23	28	33	38	43	48	53	58	63
$B, \text{ мм рт.ст.}$	758	745	754	761	752	753	759	747	757	760
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$V, \text{ л}$	700	750	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150
$p_{\text{изб}}, \text{ бар}$	4,0	3,5	3,0	2,5	9,5	10,0	10,5	11,0	11,5	12,0
$t, \text{ }^\circ\text{C}$	15	16	17	18	19	21	22	23	24	25
$p_{\text{вак}}, \text{ кПа}$	21	26	31	36	41	46	51	56	61	66
$B, \text{ мм рт.ст.}$	743	749	744	741	742	754	746	751	748	755

Решение

Вычислим значения абсолютного давления для двух состояний воздуха:

$$p_1 = B + p_{\text{изб}} = 768 \cdot 133,32 \text{ Па} + 0,2 \cdot 10^6 \text{ Па} = 302,4 \cdot 10^3 \text{ Па.}$$

$$p_2 = B - p_{\text{вак}} = 768 \cdot 133,32 \text{ Па} - 420 \cdot 133,32 \text{ Па} = 46,4 \cdot 10^3 \text{ Па.}$$

Воспользуемся уравнением состояния и вычислим массу воздуха для каждого из состояний:

$$m_1 = \frac{p_1 V}{RT_1} = \frac{302,4 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot 0,5 \text{ м}^3}{287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 293 \text{ К}} = 1,8 \text{ кг.}$$

$$m_2 = \frac{p_2 V}{RT_2} = \frac{46,4 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot 0,5 \text{ м}^3}{287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 293 \text{ К}} = 0,28 \text{ кг.}$$

Таким образом, чтобы абсолютное давление воздуха в сосуде снизилось от $p_1 = 302,4$ кПа до $p_2 = 46,4$ кПа, из сосуда необходимо выкачать воздух в количестве:

$$\Delta m = m_1 - m_2 = 1,8 \text{ кг} - 0,28 \text{ кг} = 1,52 \text{ кг}.$$

Ответ: $\Delta m = 1,52$ кг.

2.10. Компрессор нагнетает сжатый воздух в резервуар, в результате чего давление в резервуаре повышается от атмосферного $p_1 = 760$ мм рт.ст. до давления $p_2 = 7$ бар, а температура – от 20 до 25 °С. Объем резервуара 56 м³. Определить массу воздуха, поданного компрессором в резервуар.

Исходные данные для решения задачи № 2.10

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
B , мм рт.ст.	743	749	744	741	742	754	746	751	748	755
p_2 , бар	7,9	11,5	3,2	13,8	22,6	14,3	17,5	10,1	16,2	18,0
t_1 , °С	12	21	7	14	17	11	16	20	24	18
t_2 , °С	18	34	26	41	19	16	24	27	31	23
V , м ³	64	25	18	41	39	32	14	56	44	51
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
B , мм рт.ст.	758	745	754	761	752	753	759	747	757	760
p_2 , бар	10,2	13,8	5,5	16,1	24,9	16,6	19,8	12,4	18,5	20,3
t_1 , °С	13	23	9	25	19	27	21	22	26	29
t_2 , °С	17	29	12	27	25	31	28	26	32	34
V , м ³	61	22	15	38	36	29	11	53	41	48

Решение

Массу поданного компрессором воздуха определим по формуле:

$$\Delta m = m_2 - m_1, \tag{1}$$

где

m_1 – начальная масса воздуха в резервуаре при давлении $B=760$ мм рт.ст.;

m_2 – масса воздуха в резервуаре при давлении $p = 7$ бар.

Определим эти массы с помощью уравнения состояния:

$$m_1 = \frac{p_1 V}{RT_1} = \frac{760 \cdot 133,32 \text{ Па} \cdot 56 \text{ м}^3}{287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 293 \text{ К}} = 67,5 \text{ кг.}$$

$$m_2 = \frac{p_2 V}{RT_2} = \frac{7 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 56 \text{ м}^3}{287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 298 \text{ К}} = 458,3 \text{ кг.}$$

Подставим эти значения в формулу (1) и найдем значение массы воздуха, дополнительно поданного в резервуар компрессором:

$$\Delta m = 458,3 \text{ кг} - 67,5 \text{ кг} = 390,8 \text{ кг.}$$

Ответ: $\Delta m = 390,8$ кг.

2.11. Баллон объемом 20 литров заполнен кислородом. Показания манометра составляют 9 МН/м² при температуре кислорода 15 °С. После израсходования части кислорода давление снизилось до 6,6 МН/м², а температура – до 10 °С. Определить массу израсходованного кислорода. Показания ртутного барометра составляют 745 мм рт.ст.

Исходные данные для решения задачи № 2.11

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V , л	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
$p_{\text{изб.1}}$, МПа	16,5	16,0	15,5	15,0	14,5	14,0	13,5	13,0	12,5	12,0
$p_{\text{изб.2}}$, МПа	11,2	13,0	9,7	13,1	5,3	6,8	10,4	1,4	3,9	8,6
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
V , л	12	14	16	18	42	44	46	48	50	52
$p_{\text{изб.1}}$, МПа	11,5	11,0	10,5	10,0	9,5	8,5	8,0	7,5	7,0	6,5
$p_{\text{изб.2}}$, МПа	2,4	3,8	9,2	6,7	7,1	1,2	3,4	4,2	1,4	2,3

Решение

Запишем уравнение состояния для произвольной массы идеального газа:

$$pV = mRT \rightarrow m = \frac{pV}{RT}. \quad (1)$$

Вычислим значения абсолютного давления для двух состояний:

$$p_1 = B + p_{\text{изб.1}} = 745 \cdot 133,32 \text{ Па} + 9 \cdot 10^6 \text{ Па} = 9099,3 \cdot 10^3 \text{ Па}.$$

$$p_2 = B + p_{\text{изб.2}} = 745 \cdot 133,32 \text{ Па} + 6,6 \cdot 10^6 \text{ Па} = 6693,3 \cdot 10^3 \text{ Па}.$$

Подставим найденные значения p_1 и p_2 в формулу (1) и определим начальную массу кислорода в баллоне m_1 и массу m_2 , оставшуюся после расходования части кислорода:

$$m_1 = \frac{p_1 V}{RT_1} = \frac{9099,3 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot 20 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3}{259,8 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 288 \text{ К}} = 2,43 \text{ кг}.$$

$$m_2 = \frac{p_2 V}{RT_2} = \frac{6693,3 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot 20 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3}{259,8 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 283 \text{ К}} = 1,82 \text{ кг}.$$

Вычислим массу израсходованного кислорода:

$$\Delta m = m_1 - m_2 = 2,43 \text{ кг} - 1,82 \text{ кг} = 0,61 \text{ кг}.$$

Ответ: $\Delta m = 0,61 \text{ кг}$.

2.12. В сосуде цилиндрической формы, имеющим внутренний диаметр $d = 0,6 \text{ м}$ и высоту $h = 2,4 \text{ м}$, находится воздух при температуре $18 \text{ }^\circ\text{C}$. Давление по показаниям барометра составляет 764 мм рт.ст. , а давление по показаниям подключенного к сосуду манометра – $7,65 \text{ бар}$. Определить массу воздуха в сосуде.

Исходные данные для решения задачи № 2.12

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>d</i> , см	25	48	73	62	41	58	18	100	75	85
<i>h</i> , м	1,2	4,6	3,1	1,5	2,2	1,8	2,6	3,4	4,3	4,8
<i>t</i> , °С	24	61	-3	32	15	-10	57	9	-22	19
<i>B</i> , мм рт.ст.	731	752	761	748	739	754	736	743	755	746
<i>p</i> , бар	11,5	10,1	13,8	7,9	16,2	14,3	17,5	3,2	18,0	22,6
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
<i>d</i> , см	29	52	77	66	45	62	22	104	79	89
<i>h</i> , м	1,4	4,8	3,3	1,7	2,4	2,0	2,8	3,6	4,5	5,0
<i>t</i> , °С	27	64	0	35	18	-7	60	12	-19	22
<i>B</i> , мм рт.ст.	734	756	765	753	741	757	740	745	758	744
<i>p</i> , бар	19,9	12,5	16,2	10,3	18,6	16,7	19,9	5,6	20,4	25,3

Решение

Массу воздуха в сосуде определим по уравнению состояния:

$$m = \frac{pV}{RT}. \quad (1)$$

Вычислим объем воздуха, находящегося в сосуде цилиндрической формы:

$$V = \pi r^2 \cdot h = 3,14 \cdot 0,3^2 \text{ м}^2 \cdot 2,4 \text{ м} = 0,68 \text{ м}^3.$$

Определим абсолютное давление воздуха *p* :

$$p = B + p_{\text{изб}} = 764 \cdot 133,32 \text{ Па} + 7,65 \cdot 10^5 \text{ Па} = 866 \text{ 856 Па}.$$

Подставим найденные значения *p* и *V* в формулу (1):

$$m = \frac{866 \text{ 856 Па} \cdot 0,68 \text{ м}^3}{287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 291 \text{ К}} = 7,06 \text{ кг}.$$

Ответ: *m* = 7,06 кг.

РАЗДЕЛ 3. ГАЗОВЫЕ СМЕСИ

3.1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Под *газовой смесью* понимают механическую смесь нескольких газов, химически между собой не взаимодействующих. На практике часто приходится иметь дело с газовыми смесями, например, воздухом, продуктами сгорания топлива, природными газами и др.

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

Массовая доля g_i – это отношение массы i -го газа m_i , входящего в смесь, к массе всей смеси $m_{\text{см}} = m_1 + m_2 + \dots + m_n$:

$$g_i = \frac{m_i}{m_{\text{см}}} \quad \text{или}$$
$$g_1 = \frac{m_1}{m_{\text{см}}}; \quad g_2 = \frac{m_2}{m_{\text{см}}}; \quad \dots \quad g_n = \frac{m_n}{m_{\text{см}}},$$

где n – количество компонентов, входящих в газовую смесь.

Сумма массовых долей компонентов газовой смеси равна единице, т.е.:

$$\sum_{i=1}^n g_i = g_1 + g_2 + \dots + g_n = 1.$$

Объемная доля r_i – это отношение парциального объема i -го газа V_i , входящего в смесь, к объему всей смеси $V_{\text{см}}$:

$$r_i = \frac{V_i}{V_{\text{см}}}.$$

При этом под *парциальным объемом* газа понимают такой объем, который занимал бы этот газ при температуре и давлении газовой смеси.

Сумма объемных долей газов, входящих в газовую смесь, равна единице:

$$\sum_{i=1}^n r_i = r_1 + r_2 + \dots + r_n = 1.$$

Мольная доля y_i – это отношение числа киломолей i -го газа M_i , входящего в смесь, к общему количеству киломолей всей смеси $M_{\text{см}}$:

$$y_i = \frac{M_i}{M_{\text{см}}},$$

Сумма мольных долей газов, входящих в газовую смесь, равна единице:

$$\sum_{i=1}^n y_i = y_1 + y_2 + \dots + y_n = 1.$$

Как правило, газовые смеси задаются **массовым** или **объемным составом**, при этом указываются массовые либо объемные доли, между которыми существует определенная зависимость.

Для перевода *массовых долей* в объемные используют формулу:

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

Формула для перевода *объемных долей* в массовые имеет вид:

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

Плотность смеси $\rho_{\text{см}}$ (кг/м³) определяется из выражения

$$\rho_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n r_i \rho_i = r_1 \rho_1 + r_2 \rho_2 + \dots + r_n \rho_n$$

или, если известен массовый состав, по формуле

$$\rho_{\text{см}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\rho_i}}.$$

Значение *кажущейся молекулярной массы* газовой смеси $\mu_{\text{см}}$ (кг/кмоль) можно вычислить через объемные доли по формуле

$$\mu_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n r_i \mu_i$$

или по массовому составу

$$\mu_{\text{см}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\mu_i}} .$$

Выражения для определения газовой постоянной газовой смеси $R_{\text{см}}$ (Дж/кг·К) имеют вид:

$$R_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n g_i R_i ;$$

$$R_{\text{см}} = \frac{\bar{R}}{\mu_{\text{см}}} = \frac{8314}{\mu_{\text{см}}} .$$

Давление смеси $p_{\text{см}}$ согласно закону Дальтона определяется как сумма парциальных давлений компонентов смеси p_i :

$$p_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n p_i .$$

Парциальное давление p_i – это часть общего давления газовой смеси, создаваемая i -ым компонентом данной смеси. Иными словами, это давление, которое имел бы i -ый компонент смеси, если бы он один занимал весь объем смеси при ее температуре. Парциальное давление i -го компонента можно вычислить по формулам:

$$p_i = r_i p_{\text{см}} ;$$

$$p_i = g_i \frac{R_i}{R_{\text{см}}} p_{\text{см}} .$$

3.2. ЗАДАНИЯ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ

3.1. Произведенный с помощью аппарата Орса анализ продуктов сгорания топлива показал их следующий состав, заданный объемными долями: CO_2 – 12,2 %, O_2 – 7,1 %, CO – 0,4 %, N_2 – 80,3 %. Определить массовые доли входящих в смесь газов. Ответ представить в долях и в процентах.

Исходные данные для решения задачи № 3.1

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$r_{\text{CO}_2}, \%$	11,3	14,5	12,6	11,7	12,1	13,2	12,7	13,4	11,9	12,3
$r_{\text{O}_2}, \%$	5,6	6,8	9,2	7,4	6,5	8,7	6,1	5,9	7,5	8,1
$r_{\text{CO}}, \%$	0,2	0,7	1,3	1,0	0,3	0,9	0,5	1,1	0,8	1,2
$r_{\text{N}_2}, \%$	82,9	78,0	76,9	79,9	81,1	77,2	80,7	79,6	79,8	78,4
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$r_{\text{CO}_2}, \%$	9,3	12,5	10,6	9,7	10,1	11,2	10,7	11,4	9,9	10,3
$r_{\text{O}_2}, \%$	7,6	8,8	11,2	9,4	8,5	10,7	8,1	7,9	9,5	10,1
$r_{\text{CO}}, \%$	1,7	2,2	2,8	2,5	1,8	2,4	2,0	2,6	2,3	2,7
$r_{\text{N}_2}, \%$	81,4	76,5	75,4	78,4	79,6	75,7	79,2	78,1	78,3	76,9

Решение

Зная значения объемных долей r_i , массовые доли g_i можно вычислить по формуле:

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

Для рассматриваемой газовой смеси, состоящей из четырех компонентов, формула (1) примет вид:

$$g_i = \frac{r_i \mu_i}{r_{\text{CO}_2} \mu_{\text{CO}_2} + r_{\text{O}_2} \mu_{\text{O}_2} + r_{\text{CO}} \mu_{\text{CO}} + r_{\text{N}_2} \mu_{\text{N}_2}} \quad (2)$$

Значения молекулярной массы μ_i для каждого из компонентов газовой смеси можно определить по таблице Менделеева или по табличным данным:

$$\mu_{\text{CO}_2} = 44 \text{ кг/кмоль}, \mu_{\text{O}_2} = 32 \text{ кг/кмоль}, \mu_{\text{CO}} = 28 \text{ кг/кмоль}, \mu_{\text{N}_2} = 28 \text{ кг/кмоль}.$$

Подставим значения молекулярной массы в формулу (2) и вычислим массовые доли соответственно для CO_2 , O_2 , CO и N_2 :

$$g_{\text{CO}_2} = \frac{0,122 \cdot 44}{0,122 \cdot 44 + 0,071 \cdot 32 + 0,004 \cdot 28 + 0,803 \cdot 28}$$

$$g_{\text{CO}_2} = \frac{5,37}{30,24} = 0,177 = 17,7 \%$$

$$g_{\text{O}_2} = \frac{0,071 \cdot 32}{30,24} = 0,075 = 7,5 \%$$

$$g_{\text{CO}} = \frac{0,004 \cdot 28}{30,24} = 0,004 = 0,4 \%$$

$$g_{\text{N}_2} = \frac{0,803 \cdot 28}{30,24} = 0,744 = 74,4 \%$$

Правильность расчетов проверим по условию:

$$\sum_{i=1}^n g_i = g_{\text{CO}_2} + g_{\text{O}_2} + g_{\text{CO}} + g_{\text{N}_2} = 1;$$

$$0,177 + 0,075 + 0,004 + 0,744 = 1.$$

Ответ: $g_{\text{CO}_2} = 0,177 = 17,7 \%$; $g_{\text{O}_2} = 0,075 = 7,5 \%$;
 $g_{\text{CO}} = 0,004 = 0,4 \%$; $g_{\text{N}_2} = 0,744 = 74,4 \%$.

3.2. В состав газовой смеси входят водород и окись углерода. Массовая доля водорода $g_{\text{H}_2} = 6,67 \%$. Определить газовую постоянную смеси и ее удельный объем при нормальных условиях.

Исходные данные для решения задачи № 3.2

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$g_{\text{H}_2}, \%$	13,1	24,8	11,9	8,7	31,3	15,6	23,2	17,9	29,0	14,4
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$g_{\text{H}_2}, \%$	16,1	27,8	14,9	11,7	34,3	18,6	26,2	20,9	32,0	17,4

Решение

Массовую долю окиси углерода (CO) определим из условия:

$$\sum_{i=1}^n g_i = g_{H_2} + g_{CO} = 1 \rightarrow g_{CO} = 1 - g_{H_2};$$

$$g_{CO} = 1 - 0,067 = 0,933 .$$

Для вычисления газовой постоянной смеси воспользуемся формулой:

$$R_{см} = \sum_{i=1}^n g_i R_i = g_{H_2} R_{H_2} + g_{CO} R_{CO};$$

$$R_{см} = 0,067 \cdot 4124 + 0,933 \cdot 296,8 = 553,2 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} .$$

Удельный объем определим из уравнения состояния для 1 кг газа, приняв во внимания, что при нормальных условиях $p = 760$ мм рт.ст., $t = 0$ °С:

$$pv = RT \rightarrow v = \frac{RT}{p} .$$

$$v = \frac{553,2 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 273 \text{ К}}{760 \cdot 133,32 \text{ Па}} = 1,49 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} .$$

Ответ: $v = 1,49 \text{ м}^3/\text{кг}$.

3.3. Определить массовый состав газовой смеси, состоящей из углекислого газа и азота, если значение парциального давления углекислого газа составляет 1,2 бар, а давление смеси – 3 бар. Ответ представить в долях и в процентах.

Исходные данные для решения задачи № 3.3

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
p_{CO_2} , бар	3,8	4,6	12,5	14,1	2,9	15,4	6,7	8,3	7,8	1,4
$p_{см}$, бар	7	15	26	19	43	34	18	9	11	6
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
p_{CO_2} , бар	4,3	5,9	13,2	14,7	18,6	12,4	21,5	7,3	14,9	3,1
$p_{см}$, бар	13	21	32	25	49	40	24	16	36	8

Решение

Поскольку из закона Дальтона следует, что давление смеси определяется как сумма парциальных давлений компонентов, входящих в эту смесь, определим парциальное давление азота:

$$p_{см} = \sum_{i=1}^n p_i = p_{CO_2} + p_{N_2} ;$$

$$p_{N_2} = p_{см} - p_{CO_2} = 3 \text{ бар} - 1,2 \text{ бар} = 1,8 \text{ бар} .$$

Зная давление смеси и парциальные давления ее компонентов, вычислим объемные доли по формуле:

$$p_i = r_i p_{см} \rightarrow r_i = \frac{p_i}{p_{см}} ;$$

$$r_{CO_2} = \frac{p_{CO_2}}{p_{см}} = \frac{1,2 \text{ бар}}{3 \text{ бар}} = 0,4 ;$$

$$r_{N_2} = \frac{1,8 \text{ бар}}{3 \text{ бар}} = 0,6 \text{ или } r_{N_2} = 1 - r_{CO_2} = 0,6 .$$

Воспользуемся выражением для перевода объемных долей в массовые и вычислим последние:

$$g_i = \frac{r_i \mu_i}{\sum_{i=1}^n r_i \mu_i} = \frac{r_i \mu_i}{r_{CO_2} \mu_{CO_2} + r_{N_2} \mu_{N_2}} ;$$

$$g_{CO_2} = \frac{0,4 \cdot 44}{0,4 \cdot 44 + 0,6 \cdot 28} = 0,51 = 51 \% ;$$

$$g_{N_2} = \frac{0,6 \cdot 28}{0,4 \cdot 44 + 0,6 \cdot 28} = 0,49 = 49 \% \text{ или } 100 - 51 = 49 \% .$$

Ответ: $g_{CO_2} = 0,51 = 51 \% ; g_{N_2} = 0,49 = 49 \% .$

3.4. Атмосферный воздух имеет примерно следующий массовый состав: $g_{O_2} = 23,2 \% , g_{N_2} = 76,8 \% .$ Определить объемные доли компонентов, их парциальные давления, газовую постоянную воздуха, его кажущуюся молекулярную массу, если давление воздуха составляет 746 мм рт.ст.

Исходные данные для решения задачи № 3.4

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>B</i> , мм рт.ст.	734	738	742	746	750	754	758	762	766	770
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
<i>B</i> , мм рт.ст.	732	736	740	744	748	752	756	760	764	768

Решение

Воспользуемся выражением для перевода массовых долей в объемные и вычислим последние:

$$r_i = \frac{\frac{g_i}{\mu_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\mu_i}} = \frac{\frac{g_i}{\mu_i}}{\frac{g_{O_2}}{\mu_{O_2}} + \frac{g_{N_2}}{\mu_{N_2}}} ;$$

$$r_{O_2} = \frac{\frac{g_{O_2}}{\mu_{O_2}}}{\frac{g_{O_2}}{\mu_{O_2}} + \frac{g_{N_2}}{\mu_{N_2}}} = \frac{\frac{0,232}{32}}{\frac{0,232}{32} + \frac{0,768}{28}} = 0,21;$$

$$r_{N_2} = \frac{\frac{g_{N_2}}{\mu_{N_2}}}{\frac{g_{O_2}}{\mu_{O_2}} + \frac{g_{N_2}}{\mu_{N_2}}} = \frac{\frac{0,768}{28}}{\frac{0,232}{32} + \frac{0,768}{28}} = 0,79;$$

Газовую постоянную воздуха определим по формуле:

$$R_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n g_i R_i = g_{O_2} R_{O_2} + g_{N_2} R_{N_2};$$

$$R_{\text{см}} = 0,232 \cdot 259,8 + 0,768 \cdot 296,8 = 288,2 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Кажущуюся молекулярную массу смеси вычислим из выражения

$$\mu_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n r_i \mu_i = r_{O_2} \mu_{O_2} + r_{N_2} \mu_{N_2} =$$

$$= 0,21 \cdot 32 + 0,79 \cdot 28,02 = 28,85 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$$

или по формуле

$$\mu_{\text{см}} = \frac{\bar{R}}{R_{\text{см}}} = \frac{8314}{288,2} = 28,85 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}.$$

Рассчитаем парциальные давления компонентов газовой смеси:

$$p_{O_2} = r_{O_2} \cdot p = 0,21 \cdot 746 \text{ мм рт. ст.} = 156,7 \text{ мм рт. ст.}$$

$$p_{N_2} = r_{N_2} \cdot p = 0,79 \cdot 746 \text{ мм рт. ст.} = 589,3 \text{ мм рт. ст.}$$

Ответ: $r_{O_2} = 0,21$; $r_{N_2} = 0,79$;

$p_{O_2} = 156,7$ мм рт. ст.; $p_{N_2} = 589,3$ мм рт. ст.;

$R_{\text{см}} = 288,2$ Дж/(кг·К); $\mu_{\text{см}} = 28,85$ кг/кмоль.

3.3. ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

3.5. Газовая смесь имеет следующий массовый состав: CO₂ – 18 %, O₂ – 12 %, N₂ – 70 %. До какого давления нужно довести эту смесь массой 8 кг, чтобы при температуре 180 °С ее объем занимал 4 м³, если изначально она находится при нормальных условиях? Ответ представить в килопаскалях кПа.

Исходные данные для решения задачи № 3.5

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$g_{CO_2}, \%$	13	24	11	8	31	15	23	17	29	14
$g_{O_2}, \%$	7	15	26	19	43	34	18	9	11	9
$g_{N_2}, \%$	80	61	63	73	26	51	59	74	60	77
$t, ^\circ\text{C}$	132	85	4	29	121	65	72	18	47	54
$V, \text{м}^3$	13	2	9	3	8	6	11	15	10	7
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$g_{CO_2}, \%$	15	26	13	10	33	17	25	19	31	16
$g_{O_2}, \%$	9	17	28	21	45	36	20	11	13	10
$g_{N_2}, \%$	76	57	59	69	22	47	55	70	56	74
$t, ^\circ\text{C}$	135	88	7	32	124	68	75	21	50	57
$V, \text{м}^3$	16	5	12	4	14	17	18	19	20	21

Решение

Поскольку масса, объем и температура смеси известны, для вычисления давления можно воспользоваться уравнением состояния, предварительно рассчитав газовую постоянную смеси по формуле:

$$R_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n g_i R_i = g_{CO_2} R_{CO_2} + g_{O_2} R_{O_2} + g_{N_2} R_{N_2};$$

$$R_{\text{см}} = 0,18 \cdot 188,9 + 0,12 \cdot 259,8 + 0,7 \cdot 296,8 = 272,9 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Запишем уравнение состояния для газовой смеси и выразим давление:

$$pV = mRT \rightarrow p = \frac{mRT}{V};$$

$$p = \frac{8 \text{ кг} \cdot 272,9 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 453 \text{ К}}{4 \text{ м}^3} = 247\,247 \text{ Па} = 247,2 \text{ кПа}.$$

Ответ: $p = 247,2 \text{ кПа}.$

3.6. В цилиндр двигателя поступает газовая смесь, состоящая из 20 массовых долей воздуха и одной доли коксового газа. Вычислить плотность, удельный объем смеси при нормальных условиях, а также парциальное давление воздуха.

Исходные данные для решения задачи № 3.6

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Воздух, долей	13,1	24,8	11,9	8,7	31,3	15,6	23,2	17,9	29,0	14,4
Коксовый газ, долей	0,2	0,7	1,3	1,0	0,3	0,9	0,5	1,1	0,8	1,2
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Воздух, долей	17,1	28,8	15,9	12,7	35,3	19,6	27,2	21,9	33,0	18,4
Коксовый газ, долей	2,2	2,7	3,3	3,0	2,3	2,9	2,5	3,1	2,8	3,2

Решение

Для начала определим массовый состав газовой смеси. Для этого воспользуемся пропорцией, приняв за 100 % общее количество массовых долей:

$$\begin{array}{l} 21 - 100 \% \\ 20 - g_{\text{возд.}} \\ 1 - g_{\text{к.г.}} \end{array} \rightarrow \begin{array}{l} g_{\text{возд.}} = \frac{20}{21} \cdot 100 \% = 95,2 \% = 0,952 ; \\ g_{\text{к.г.}} = 1 - 0,952 = 0,048 . \end{array}$$

Плотность смеси вычислим по формуле (плотность воздуха и коксового газа при нормальных условиях берется из табличных данных):

$$\rho_{\text{см}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\rho_i}} = \frac{1}{\frac{g_{\text{возд.}}}{\rho_{\text{возд.}}} + \frac{g_{\text{к.г.}}}{\rho_{\text{к.г.}}}};$$

$$\rho_{\text{см}} = \frac{1}{\frac{0,952}{1,293 \text{ кг/м}^3} + \frac{0,048}{0,515 \text{ кг/м}^3}} = 1,21 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Удельный объем является величиной, обратной плотности:

$$v_{\text{см}} = \frac{1}{\rho_{\text{см}}} = \frac{1}{1,21 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}} = 0,83 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

Парциальное давление воздуха определим из выражения:

$$p_{\text{возд.}} = g_{\text{возд.}} \frac{R_{\text{возд.}}}{R_{\text{см}}} p_{\text{см}}. \quad (1)$$

Вычислим газовую постоянную смеси:

$$R_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n g_i R_i = g_{\text{возд.}} R_{\text{возд.}} + g_{\text{к.г.}} R_{\text{к.г.}};$$

$$R_{\text{см}} = 0,952 \cdot 287 + 0,048 \cdot 721 = 307,8 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Подставим полученное значение $R_{\text{см}}$ в формулу (1):

$$p_{\text{возд.}} = 0,952 \cdot \frac{287}{307,8} \cdot 760 \text{ мм рт. ст.} = 675 \text{ мм рт. ст.}$$

Ответ: $\rho_{\text{см}} = 1,21 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $v_{\text{см}} = 0,83 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$; $p_{\text{возд.}} = 675 \text{ мм рт. ст.}$

3.7. В емкость объемом 120 м^3 закачан коксовый газ под давлением $0,5 \text{ МПа}$ при температуре $19 \text{ }^\circ\text{C}$. Состав газа следующий: $r_{\text{H}_2} = 0,45$, $r_{\text{CH}_4} = 0,33$, $r_{\text{CO}} = 0,14$, $r_{\text{N}_2} = 0,08$. После израсходования части газа давление

в емкости снизилось до 0,3 МПа, а температура упала до 13 °С. Определить массу израсходованного газа.

Исходные данные для решения задачи № 3.7

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V, \text{ м}^3$	85	44	72	28	106	55	37	92	63	78
$p_1, \text{ кПа}$	340	210	460	570	390	260	410	640	750	350
$p_2, \text{ кПа}$	210	105	120	325	180	240	405	130	360	135
$t_1, \text{ }^\circ\text{C}$	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
$t_2, \text{ }^\circ\text{C}$	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$r_{\text{H}_2}, \%$	12,6	13,2	12,1	14,5	11,3	11,7	11,9	12,3	12,7	13,4
$r_{\text{CH}_4}, \%$	9,2	8,7	6,5	6,8	5,6	7,4	7,5	8,1	6,1	5,9
$r_{\text{CO}}, \%$	1,3	0,9	0,3	0,7	0,2	1,0	0,8	1,2	0,5	1,1
$r_{\text{N}_2}, \%$	76,9	77,2	81,1	78,0	82,9	79,9	79,8	78,4	80,7	79,6

Решение

Массу израсходованного газа определим по формуле:

$$\Delta m = m_1 - m_2, \quad (1)$$

где

m_1 и m_2 – масса газа в емкости при давлении соответственно $p_1 = 0,5$ МПа и $p_2 = 0,3$ МПа.

Поскольку коксовый газ в емкости находится при сравнительно небольшом давлении, воспользуемся уравнением состояния для идеального газа и выразим массу:

$$pV = mRT \rightarrow m = \frac{pV}{RT}. \quad (2)$$

Чтобы вычислить значения m_1 и m_2 по формуле (2), необходимо найти значение газовой постоянной $R_{см}$ коксового газа с заданным составом. Для этого воспользуемся следующей формулой:

$$R_{см} = \sum_{i=1}^n g_i R_i = g_{H_2} R_{H_2} + g_{CH_4} R_{CH_4} + g_{CO} R_{CO} + g_{N_2} R_{N_2}. \quad (3)$$

Для перевода объемных долей r_i в массовые доли g_i воспользуемся соотношением:

$$g_i = \frac{r_i \mu_i}{\sum_{i=1}^n r_i \mu_i}. \quad (4)$$

Для рассматриваемой газовой смеси, состоящей из четырех компонентов, формула (4) примет вид:

$$g_i = \frac{r_i \mu_i}{r_{H_2} \mu_{H_2} + r_{CH_4} \mu_{CH_4} + r_{CO} \mu_{CO} + r_{N_2} \mu_{N_2}}. \quad (5)$$

Значения молекулярной массы μ_i для каждого из компонентов газовой смеси можно определить по таблице Менделеева или по табличным данным:

$\mu_{H_2} = 2$ кг/кмоль, $\mu_{CH_4} = 16$ кг/кмоль, $\mu_{CO} = 28$ кг/кмоль, $\mu_{N_2} = 28$ кг/кмоль.

Подставим данные значения в формулу (5) и вычислим массовые доли соответственно для H_2 , CH_4 , CO и N_2 :

$$g_{H_2} = \frac{0,46 \cdot 2}{0,46 \cdot 2 + 0,32 \cdot 16 + 0,15 \cdot 28 + 0,07 \cdot 28};$$

$$g_{H_2} = \frac{0,46 \cdot 2}{12,2} = 0,075;$$

$$g_{CH_4} = \frac{0,32 \cdot 16}{12,2} = 0,420;$$

$$g_{CO} = \frac{0,15 \cdot 28}{12,2} = 0,344;$$

$$g_{N_2} = \frac{0,07 \cdot 28}{12,2} = 0,161.$$

Правильность расчетов проверим по условию:

$$\sum_{i=1}^n g_i = g_{H_2} + g_{CH_4} + g_{CO} + g_{N_2} = 1;$$
$$0,075 + 0,420 + 0,344 + 0,161 = 1 .$$

Подставим полученные значения g_i в формулу (3) и вычислим газовую постоянную смеси $R_{см}$:

$$R_{см} = 0,075 \cdot 4124 + 0,420 \cdot 518,8 + 0,344 \cdot 296,8 + 0,161 \cdot 296,8 ;$$

$$R_{см} = 677,1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} .$$

Найденное значение $R_{см}$ подставим в формулу (2) и вычислим значения параметров m_1 и m_2 :

$$m_1 = \frac{p_1 V}{RT_1} = \frac{0,5 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot 120 \text{ м}^3}{677,1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 292 \text{ К}} = 303,5 \text{ кг} .$$

$$m_2 = \frac{p_2 V}{RT_2} = \frac{0,3 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot 120 \text{ м}^3}{677,1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 286 \text{ К}} = 185,9 \text{ кг} .$$

Подставим полученные значения в формулу (1) и вычислим массу израсходованного коксового газа:

$$\Delta m = 303,5 \text{ кг} - 185,9 \text{ кг} = 117,6 \text{ кг} .$$

Ответ: $\Delta m = 117,6 \text{ кг} .$

РАЗДЕЛ 4. АНАЛИЗ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

4.1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

4.1.1. Изотермический процесс

Уравнение *изотермического* процесса имеет вид:

$$pv = \text{const} \quad \text{или} \quad p_1v_1 = p_2v_2 = p_3v_3 = \dots$$

Если умножить правую и левую части на массу m , получим:

$$pV = \text{const} \quad \text{или} \quad p_1V_1 = p_2V_2 = p_3V_3 = \dots$$

Поскольку при $T = \text{const}$ значение $\Delta T = 0$, изменение внутренней энергии $\Delta u_t = c_v \cdot \Delta T = 0$. Тогда, согласно первому закону термодинамики, $q_t = l_t$.

Удельное количество теплоты и *удельная работа* в изотермическом процессе определяются по формулам:

$$q_t = l_t = RT \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} = p_1v_1 \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} = p_1v_1 \cdot \ln \frac{p_1}{p_2}.$$

Умножив данные выражения на массу m , получим формулы для вычисления *теплоты* и *работы*:

$$Q_t = L_t = mRT \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} = p_1V_1 \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} = p_1V_1 \cdot \ln \frac{p_1}{p_2}.$$

Изменение удельной энтропии в изотермическом процессе вычисляется по формуле:

$$\Delta s_t = R \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} = R \cdot \ln \frac{p_1}{p_2}.$$

В p - v и T - s координатах изотермический процесс изображается следующим образом:

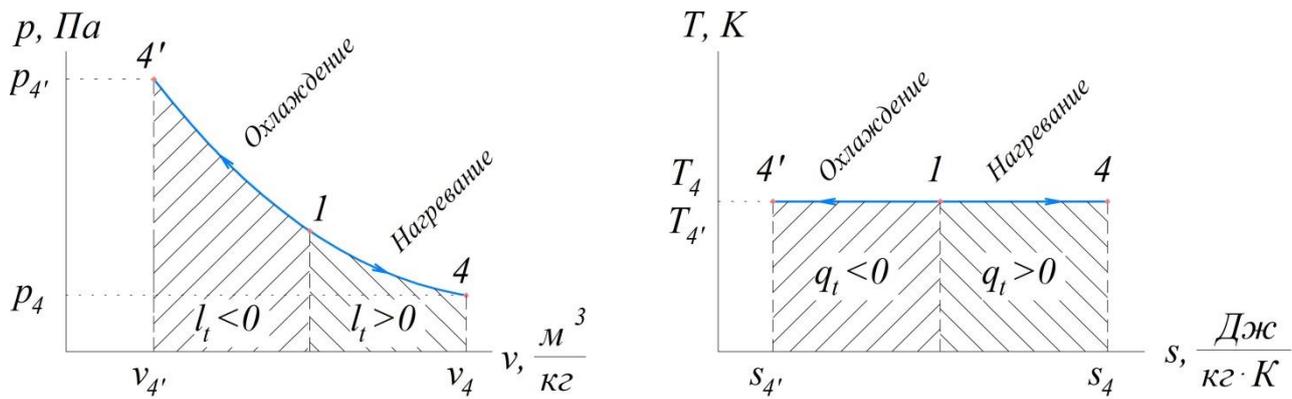


Рисунок 4.1 – Изотермический процесс в p - v и T - s координатах:

1 - 4 – изотермический подвод теплоты (расширение);

1 - $4'$ – изотермический отвод теплоты (сжатие)

4.1.2. Политропный процесс

Политропным называется обобщающий термодинамический процесс, в котором теплоемкость имеет любое, но постоянное на протяжении всего процесса значение.

Уравнение политропного процесса имеет вид:

$$pv^n = const \quad \text{или} \quad p_1 v_1^n = p_2 v_2^n = p_3 v_3^n = \dots$$

где n – показатель политропы ($-\infty \leq n \leq +\infty$).

Рассмотренные ранее основные процессы являются частными случаями политропного процесса:

- при $n = 0$: $pv^0 = p = const$ – изобарный процесс;
- при $n = 1$: $pv^1 = pv = const$ – изотермический процесс;
- при $n = k$: $pv^k = const$ – адиабатный процесс;
- при $n = \pm\infty$: $p^0 v = v = const$ – изохорный процесс*.

* Для доказательства справедливости данного результата приведем следующие математические преобразования:

1) Возведем обе части уравнения политропного процесса в степень $1/n$:

$$(pv^n)^{\left(\frac{1}{n}\right)} = const \rightarrow p^{\left(\frac{1}{n}\right)} \cdot v = const .$$

2) Подставим вместо n значения $+\infty$ и $-\infty$, тогда степень

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{\pm\infty} \approx \pm 0 = 0 .$$

Таким образом, справедливость записи уравнения политропного процесса в виде $v = const$ (при $n = \pm\infty$) подтверждается.

В политропном процессе доля теплоты, идущая на изменение внутренней энергии системы, называется *характеристикой политропного процесса*:

$$\varphi = \frac{\Delta U}{Q} = \frac{\Delta u}{q} \quad \text{или} \quad \varphi = \frac{c_v \cdot \Delta T}{c \cdot \Delta T} = \frac{c_v}{c} ,$$

где

$$c_v = \frac{R}{k-1} - \text{удельная массовая изохорная теплоемкость};$$

c – удельная массовая изохорная теплоемкость политропного процесса.

Показатель политропы и теплоемкость политропного процесса связаны между собой соотношениями:

$$n = \frac{c - c_p}{c - c_v} \quad \text{и} \quad c = c_v \cdot \frac{n - k}{n - 1} ,$$

где c_p – удельная массовая изобарная теплоемкость:

$$c_p = c_v + R \quad \text{или} \quad c_p = c_v \cdot k .$$

Показатель политропы и характеристика политропного процесса связаны соотношениями:

$$n = \frac{k\varphi - 1}{\varphi - 1} \quad \text{и} \quad \varphi = \frac{n - 1}{n - k} .$$

Также для вычисления показателя политропы пользуются выражениями:

$$n = \frac{\lg \frac{p_1}{p_2}}{\lg \frac{v_2}{v_1}}; \quad n - 1 = \frac{\lg \frac{T_2}{T_1}}{\lg \frac{v_1}{v_2}}; \quad \frac{n - 1}{n} = \frac{\lg \frac{T_2}{T_1}}{\lg \frac{p_2}{p_1}}.$$

Параметры состояния в политропном процессе связаны между собой соотношениями:

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

Количество теплоты в политропном процессе находится по формулам:

$$q = c \cdot \Delta T \quad \text{или} \quad q = c_v \cdot \frac{n - k}{n - 1} \cdot \Delta T.$$

Удельная работа в политропном процессе вычисляется по формулам:

$$l = \frac{1}{n - 1} \cdot (p_1 v_1 - p_2 v_2),$$

$$l = \frac{p_1 v_1}{n - 1} \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \right).$$

Изменение удельной энтропии в политропном процессе определяется следующим образом:

$$\Delta s = c \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} \quad \text{или} \quad \Delta s = c_v \cdot \frac{n - k}{n - 1} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}.$$

График в координатах p - v и T - s определяется уравнением политропного процесса $p v^n = \text{const}$, т.е. зависит от значения показателя политропы n .

4.2. ЗАДАНИЯ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ

Данные задачи предназначены для закрепления знаний, которые получены студентами на лекционных занятиях, посвященных изучению основных термодинамических процессов и их анализу. В данном разделе предлагаются задачи для расчета *изотермического* и *политропного* процессов. Задачи по изохорному, изобарному и адиабатному процессам решаются аналогичным образом. Каждая задача сопровождается соответствующими пояснениями.

4.1. Воздух массой m при начальном давлении p_1 и температуре t_1 расширяется изотермически до n -кратного объема. Определить:

- конечное давление (p_2 , бар);
- работу, совершаемую газом (L , кДж);
- количество теплоты в процессе (Q , кДж).

Построить график процесса в p - V координатах по пяти точкам.

Исходные данные для решения задачи № 4.1

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
m , кг	0,8	6,7	4,3	5,2	1,4	3,8	2,2	0,4	3,1	4,6
p_1 , бар	2,4	1,2	7,5	6,7	1,3	2,8	2,1	3,4	6,2	7,0
t_1 , °С	21	32	14	-20	12	68	71	-32	-12	26
n , раз	3	7	4	2	6	5	3	7	4	2
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
m , кг	7,1	2,6	1,8	3,6	5,1	4,8	0,7	1,6	3,4	0,5
p_1 , бар	4,3	1,9	3,6	4,4	7,2	5,1	4,7	8,2	4,9	5,0
t_1 , °С	48	52	57	-3	7	-44	29	11	-18	30
n , раз	6	5	3	7	5	4	6	2	7	5

Пояснения к решению задачи № 4.1

Для определения конечного давления p_2 можно воспользоваться уравнением изотермического процесса.

Работа и количество теплоты определяются по формулам, соответствующим изотермическому процессу. Недостающие значения удельного объема вычисляются с использованием уравнения состояния.

Для более точного построения графика изотермического процесса 1-2 в координатах p - V необходимо найти 3 промежуточные точки (положения точек 1 и 2, соответствующих началу и окончанию рассматриваемого процесса, уже известны). Для этого можно воспользоваться уравнением изотермического процесса, произвольно (в пределах рассматриваемого процесса) задавая значение одного неизвестного параметра и вычисляя по уравнению значение другого параметра.

Для лучшего представления под графиком в p - V координатах изобразить данный процесс на примере простейшей термодинамической системы – цилиндра с поршнем (достаточно двух крайних положений, соответствующих точкам 1 и 2).

Ответ (для варианта № 20): $p_2 = 1$ бар; $L = 70$ кДж; $Q = 70$ кДж.

4.2. Воздух массой m при температуре t_1 и давлении p_1 сжимается (расширяется) изотермически до достижения давления p_2 . Определить:

- конечный объем (V_2 , м³);
- работу в процессе (L , кДж);
- удельную работу в процессе (l , кДж/кг);
- количество теплоты в процессе (Q , кДж);
- удельную теплоту в процессе (q , кДж/кг).

Построить графики процесса в координатах p - v и p - V по 5-ти точкам.

Исходные данные для решения задачи № 4.2

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
m , кг	5,2	1,4	3,8	2,2	0,8	0,4	3,1	4,6	6,7	4,3
p_1 , бар	6,7	1,3	2,8	2,1	3,4	6,2	7,0	2,4	1,2	7,5
p_2 , бар	11,5	10,9	0,3	3,6	1,1	2,4	9,2	0,6	13,8	4,1
t_1 , °C	57	-12	48	7	-3	29	-18	11	52	31
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
m , кг	4,8	0,7	1,6	3,4	0,5	7,1	2,6	1,8	3,6	1,0
p_1 , бар	5,0	4,9	8,2	7,2	5,1	4,7	4,3	1,9	4,4	1,0
p_2 , бар	2,8	1,3	4,7	2,1	13,3	9,8	0,2	7,8	14,7	10,0
t_1 , °C	14	-20	21	34	68	12	-32	71	-9	30

Пояснения к решению задачи № 4.2

Для определения конечного объема V_2 можно воспользоваться уравнением изотермического процесса и уравнением состояния.

Работа и количество теплоты в процессе определяются по формулам, соответствующим изотермическому процессу.

Для более точного построения графиков процесса 1-2 в координатах p - v и p - V необходимо по аналогии с предыдущей задачей найти по 3 промежуточные точки (т.е. каждый график строится по 5-ти точкам).

Ответ (для варианта № 20): $V_2 = 0,087 \text{ м}^3$; $L = -200,2 \text{ кДж}$; $l = -200,2 \text{ кДж/кг}$; $Q = -200,2 \text{ кДж}$; $q = -200,2 \text{ кДж/кг}$.

4.3. В изотермическом процессе сжатия (расширения) воздуха объемом V_1 при начальном давлении p_1 и температуре t_1 от воздуха отводится (подводится) количество теплоты Q . Определить:

- давление в конце процесса (p_2 , кПа);
- объем в конце процесса (V_2 , м³);

Исходные данные для решения задачи № 4.3

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_1, \text{м}^3$	4,6	0,4	3,1	2,2	0,8	6,7	5,2	1,4	4,3	3,8
$p_1, \text{бар}$	6,7	1,3	2,8	2,1	3,4	7,0	6,2	1,2	7,5	2,4
$t_1, \text{°C}$	-20	312	168	21	171	-32	-12	26	332	14
$Q, \text{кДж}$	420	-270	35	670	-120	580	360	155	-430	320
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$V_1, \text{м}^3$	3,6	5,1	4,8	1,6	3,4	7,1	2,6	0,5	1,8	0,3
$p_1, \text{бар}$	4,4	7,2	5,1	4,7	8,2	4,9	4,3	1,9	3,6	10,0
$t_1, \text{°C}$	148	252	157	-3	57	-44	129	211	-18	300
$Q, \text{кДж}$	110	-830	170	275	190	680	435	-510	480	-500

Пояснения к решению задачи № 4.3

При решении данной задачи сразу воспользоваться уравнением изотермического процесса не получится, поскольку не известны значения термодинамических параметров для конечного состояния воздуха (p_2 и V_2).

Поскольку в условии дано значение количества теплоты в процессе, можно воспользоваться формулой для ее нахождения. Для математических преобразований и возможности вычисления неизвестных параметров необходимо помнить определение натурального логарифма \ln , т.е. логарифма с основанием $e \approx 2,718$ ($\ln = \log_e$).

$\log_e(x) = \ln(x) = z$ – логарифмом числа "x" по основанию "e" (натуральным логарифмом) называется степень "z", в которую нужно возвести основание "e", чтобы получить число "x", т.е. $e^z = x$.

Воспользовавшись уравнением для вычисления количества теплоты в изотермическом процессе и понятием натурального логарифма, можно вычислить значение p_2 . Значение V_2 определяется по уравнению изотермического процесса.

Ответ (для варианта № 20): $p_2 = 5310$ кПа; $V_2 = 0,057$ м³.

4.3. ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

4.4. В процессе политропного сжатия воздуха затрачивается работа L , причем в одном случае от газа отводится теплота Q_1 , а в другом случае газу сообщается теплота Q_2 . Определить показатели обеих политроп n_1 и n_2 . Показатель адиабаты $k = 1,4$.

Исходные данные для решения задачи № 4.4

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$ L $, кДж	510	480	110	830	170	275	190	110	680	435
$ Q_1 $, кДж	385	618	320	517	410	120	255	315	1200	450
$ Q_2 $, кДж	112	50	170	205	305	208	84	410	810	35
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$ L $, кДж	320	430	155	580	120	630	35	270	420	195
$ Q_1 $, кДж	25	180	430	80	40	533	490	115	720	250
$ Q_2 $, кДж	610	70	125	190	710	187	620	95	376	42

Пояснения к решению задачи № 4.4

В данной задаче показатель политропы n можно вычислить через характеристику политропного процесса φ , которая, в свою очередь, определяется по известной формуле с использованием первого закона термодинамики.

При подстановке числовых значений необходимо помнить правила знаков для работы и количества теплоты, принятых в термодинамике (все значения параметров в исходных данных даны по модулю, т.е. их фактические значения могут быть как положительными, так и отрицательными).

Ответ (для варианта № 20): $n_1 = 0,89$; $n_2 = 1,49$.

4.5. В цилиндре двигателя происходит сжатие воздуха по политропе с показателем n при начальной температуре t_1 и давлении p_1 . Значение степени сжатия $\varepsilon = V_1/V_2$.

Определить:

- температуру t_2 (°C);
- давление p_2 (бар).

Построить график процесса 1-2 в p - V координатах по 5 точкам.

Исходные данные для решения задачи № 4.5

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n	1,16	1,17	1,18	1,19	1,35	1,34	1,2	1,21	1,22	1,23
ε	8,0	14,0	11,5	15,5	15,0	13,0	8,5	7,5	12,5	11,0
t_1 , °C	21	14	20	32	71	18	26	48	52	57
p_1 , бар	1,05	1,00	0,80	1,10	0,85	1,00	1,05	0,85	0,90	1,15
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
n	1,24	1,25	1,26	1,27	1,28	1,29	1,30	1,31	1,32	1,33
ε	14,0	12,0	13,5	14,5	13,0	9,0	10,0	15,5	13,5	14,0
t_1 , °C	29	64	30	45	53	26	41	62	56	77
p_1 , бар	0,75	0,95	1,00	0,85	1,10	1,15	0,80	1,00	0,80	1,00

Пояснения к решению задачи № 4.5

Чтобы определить значения параметров t_2 и p_2 , достаточно воспользоваться известными соотношениями между начальными и конечными параметрами процесса.

Для построения политропного процесса в p - V координатах по 5 точкам принимается значение объема цилиндра $V_{ц} = 400 \text{ см}^3$ (0,4 л или $0,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$). Недостающие значения параметров состояния определяются из уравнения политропного процесса. При этом начальный объем $V_1 = V_{ц}$.

Ответ (для варианта № 20): $p_2 = 33,45$ бар; $t_2 = 563$ °C.

4.6. Воздух объемом V_1 при давлении p_1 и температуре t_1 расширяется (сжимается) по политропе до x -кратного объема и давления p_2 . Показатель адиабаты $k = 1,4$.

Определить:

- показатель политропы (n);
- работу в процессе (L , кДж);
- характеристику политропного процесса (φ);
- количество теплоты в процессе (Q , кДж);
- изменение внутренней энергии (ΔU , кДж);
- температуру T_2 (К);
- изменение удельной энтропии (Δs , кДж/(кг·К));
- изменение энтропии (ΔS , кДж/К).

Построить графики процесса в p - V и T - S координатах по 5 точкам.

Исходные данные для решения задачи № 4.6

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V_1 , м ³	3,1	0,4	4,6	6,7	2,2	0,8	3,8	4,3	1,4	5,2
p_1 , бар	2,8	3,4	2,1	1,3	6,7	6,2	7,0	7,5	2,4	1,2
t_1 , °С	-3	29	7	-12	14	21	6	-4	13	18
x	3,6	0,8	6,1	2,4	0,9	3,3	5,5	3,0	0,6	0,2
p_2 , бар	9,2	2,4	1,1	0,6	13,8	4,1	11,5	0,3	10,9	3,6
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
V_1 , м ³	1,8	0,5	2,6	7,1	3,4	1,7	4,8	5,1	3,6	5
p_1 , бар	4,4	1,9	4,3	4,7	5,1	7,2	4,9	8,2	5,6	4,0
t_1 , °С	-6	23	-1	20	-9	3	24	27	16	60
x	2,8	0,5	3,7	6,2	2,2	0,3	0,7	5,1	4,6	3,0
p_2 , бар	4,7	2,1	1,3	2,8	13,3	9,8	0,2	7,8	14,7	1,0

Пояснения к решению задачи № 4.6

Расчет следует выполнять с определения показателя политропы n по формуле, в которой фигурируют известные из условия задачи параметры. Затем вычисляется характеристика политропного процесса φ и работа L по стандартным формулам.

Для определения количества теплоты Q следует воспользоваться 1-ым законом термодинамики и выражением для вычисления характеристики политропного процесса φ , после чего легко вычислить значение ΔU .

При определении значения Δs по формуле для политропного процесса требуется вычислить величину T_2 , пользуясь подходящими соотношениями, и величину c_v (см. лекцию про теплоемкость). Чтобы найти значение ΔS , необходимо вычислить массу m с помощью уравнения состояния.

При построении графика процесса в p - V координатах следует определиться с отображаемыми числовыми значениями на осях координат и масштабом (ценой деления). Для нахождения промежуточных трех точек можно воспользоваться уравнением политропного процесса, устанавливающего соотношение между значениями параметров состояния в начале и в конце процесса. При этом значение одного неизвестного параметра задается по графику, а значение второго вычисляется по формуле.

Построение графика в координатах T - S осуществляется аналогично. При этом для нахождения положения 3 промежуточных точек (например, a , b и c) в формулу для вычисления ΔS (ΔS_{1-a} , ΔS_{1-b} и ΔS_{1-c}) подставляются значения температур этих точек, выбранных по графику. Фактическое значение энтропии для точки "a" будет определяться по формуле $S_a = S_1 + \Delta S_{1-a}$ (для других точек – аналогично). Для построения графика принять значение $S_1 = 1$ кДж/К.

Ответ (для варианта № 20): $n=1,26$; $L = 1923$ кДж; $\varphi = -1,86$; $Q = 672,4$ кДж; $\Delta U = -1250,6$ кДж; $T_2 = 250$ К; $\Delta s = 0,111$ кДж / (кг·К); $\Delta S = 2,32$ кДж / К.

РАЗДЕЛ 5. ВОДЯНОЙ ПАР

5.1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Водяной пар широко применяется в различных отраслях промышленности главным образом в качестве теплоносителя в теплообменных аппаратах и как рабочее тело в паросиловых установках (например, на электростанциях).

Имея высокое давление и относительно низкую температуру, пар, используемый в приведенных тепловых агрегатах, близок к состоянию жидкости, поэтому пренебрегать силами взаимодействия между молекулами пара и их размерами, как в идеальных газах, нельзя. Поэтому водяной пар считается *реальным газом* и не подчиняется уравнению состояния для идеальных газов, т.е. $pv \neq RT$.

Жидкость может превращаться в пар путем *испарения* либо *кипения*.

Испарением называется процесс парообразования, происходящего только с поверхности жидкости при любой температуре. При сообщении жидкости теплоты повышается ее температура и, соответственно, интенсивность испарения. При определенной температуре, зависящей от природы жидкости и ее давления, начинается парообразование во всей ее массе. Этот процесс называется *кипением*.

Обратный парообразованию процесс называется *конденсацией*, а образующаяся жидкость – *конденсатом*.

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

Сухим насыщенным (насыщенным) называется пар, в котором отсутствует жидкая фаза, а его температура равна температуре кипения (насыщения) для данного давления.

Перегретым является пар, температура которого выше температуры сухого насыщенного пара того же давления. Разность между температурой перегретого пара и сухого насыщенного называется *степенью перегрева пара*.

Влажным называется пар, который получается при неполном испарении жидкости, т.е. это смесь сухого пара и кипящей жидкости. Влажный пар характеризуется степенью сухости x , которая представляет собой массовую долю сухого насыщенного пара во влажном:

$$x = \frac{m_{\text{п}}}{m_{\text{п}} + m_{\text{ж}}}, \quad (5.1)$$

где

$m_{\text{п}}$ – масса сухого насыщенного пара в смеси;

$m_{\text{ж}}$ – масса кипящей жидкости в смеси;

$m_{\text{п}} + m_{\text{ж}}$ – масса смеси (влажного пара).

Например, при $x = 0,8$ (80 %) во влажном паре будет находиться 80 % насыщенного пара и 20 % кипящей жидкости.

Удельная теплота парообразования r (кДж/кг) – количество теплоты, необходимое для перевода 1 кг кипящей жидкости в сухой насыщенный пар при постоянных температуре и давлении.

При увеличении давления температура кипения воды повышается, при уменьшении давления – снижается. Например, при пониженном давлении 0,1 бар вода закипает при температуре 44,83 °С, при пониженном давлении 0,5 бар – при температуре 81,35 °С (рис. 5.1), при обычном атмосферном давлении 1 бар – при температуре 99,63 °С (рис. 5.1), при повышенном давлении 10 бар – при температуре 179,88 °С.

Существуют таблицы (рис. 5.1), в которых в зависимости от давления и температуры приводятся основные параметры пара. Все величины, относящиеся к жидкости при температуре насыщения (кипения), даются с одним штрихом (v' , i' или h' ...), а величины, относящиеся к сухому насыщенному пару – с двумя штрихами (v'' , i'' или h'' ...).

При расчетах, связанных с использованием водяного пара как рабочего тела, наиболее широко используется удельная энтальпия. При составлении таблиц водяного пара энтальпию воды при 0 °С обычно считают равной 0.

P_s	t_s	v'	v''	h'	h''	r	s'	s''
0,150	52,58	0,0010133	10,696	220,03	2596,4	2376,4	0,7367	8,0330
0,200	58,98	0,0010166	8,0288	246,83	2607,7	2360,9	0,8182	7,9269
0,250	64,08	0,0010194	6,4483	268,18	2616,6	2348,4	0,8820	7,8462
0,300	68,35	0,0010219	5,3998	286,05	2624,0	2337,9	0,9346	7,7811
0,400	75,89	0,0010265	3,9949	317,65	2636,8	2319,2	1,0261	7,6711
0,500	81,35	0,0010301	3,2415	340,57	2646,0	2305,4	1,0912	7,5951
0,550	83,74	0,0010317	2,9648	350,61	2650,0	2299,4	1,1194	7,5627
0,600	85,95	0,0010333	2,7329	359,93	2653,6	2293,7	1,1454	7,5332
0,650	88,02	0,0010347	2,5357	368,62	2657,0	2288,4	1,1696	7,5061
0,700	89,96	0,0010361	2,3658	376,77	2660,2	2283,4	1,1921	7,4811
0,750	91,78	0,0010375	2,2179	384,45	2663,2	2278,8	1,2132	7,4577
0,800	93,51	0,0010387	2,0879	391,72	2666,0	2274,3	1,2330	7,4360
0,850	95,14	0,0010400	1,9728	398,63	2668,6	2270,0	1,2518	7,4155
0,900	96,71	0,0010412	1,8701	405,21	2671,1	2265,9	1,2696	7,3963
0,950	98,20	0,0010423	1,7779	411,49	2673,5	2262,0	1,2865	7,3781
1,000	99,63	0,0010434	1,6946	417,51	2675,7	2258,2	1,3027	7,3608
1,50	111,37	0,0010530	1,1597	467,13	2693,9	2226,8	1,4336	7,2248
2,00	120,23	0,0010608	0,88592	504,7	2706,9	2202,2	1,5301	7,1286
2,50	127,43	0,0010675	0,71881	535,4	2717,2	2181,8	1,6072	7,0540
3,00	133,54	0,0010735	0,60586	561,4	2725,5	2164,1	1,6717	6,9930
3,50	138,88	0,0010789	0,52425	584,3	2632,5	2148,2	1,7273	6,6412
4,00	143,62	0,0010839	0,4624	604,7	2738,5	2133,8	1,7764	6,8966

Рисунок 5.1 – Фрагмент таблицы «Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по давлению)»

Ниже представлены формулы для определения параметров состояния воды и водяного пара.

Удельная энтальпия конденсата i_v (кДж/кг):

$$i_v = c_p \cdot t, \quad (5.2)$$

где

c_p – удельная массовая изобарная теплоемкость воды. Для не требующих особой точности расчетов $c_p \approx 4,19$ кДж/кг·°С;

t – температура конденсата (воды), °С.

Удельная энтальпия кипящей воды i' (кДж/кг):

$$i' = c_p \cdot t_n, \quad (5.3)$$

где

c_p – удельная массовая изобарная теплоемкость кипящей воды, кДж/кг·°С;

t_n – температура кипящей воды, °С.

Удельная энтальпия сухого насыщенного пара i'' (кДж/кг):

$$i'' = i' + r, \quad (5.4)$$

где

i' – удельная энтальпия кипящей воды, кДж/кг;

r – теплота парообразования, кДж/кг (рис. 5.1).

Удельная энтальпия влажного пара i_x (кДж/кг):

$$i_x = i' + x \cdot r, \quad (5.5)$$

где

i' – удельная энтальпия кипящей воды, кДж/кг;

x – степень сухости пара, $x = 0 \dots 1$;

r – теплота парообразования, кДж/кг.

Удельная энтальпия перегретого пара $i_{\text{п}}$ (кДж/кг):

$$i_{\text{п}} = i'' + c_p \cdot (t_{\text{п}} - t_{\text{н}}), \quad (5.6)$$

где

i'' – удельная энтальпия сухого насыщенного пара, кДж/кг;

$t_{\text{п}}$ – температура перегретого пара, °С;

$t_{\text{н}}$ – температура насыщения для данного давления, °С.

c_p – удельная массовая изобарная теплоемкость перегретого пара, кДж/кг·°С. Ее значение зависит от температуры и давления.

Использование таблиц для водяного пара позволяет облегчить расчеты. На рисунке 5.2 представлен фрагмент таблицы для перегретого водяного пара. Значения параметров, находящиеся выше горизонтальной прямой, относятся к воде, а значения, находящиеся ниже – к перегретому пару. Поскольку давление и температура указываются с определенным шагом, для получения промежуточных данных необходимо пользоваться методом интерполяции или более точными таблицами.

<i>t</i>	<i>p</i> = 0,80 бар			<i>p</i> = 0,90 бар			<i>p</i> = 1,00 бар			<i>p</i> = 2,00 бар		
	<i>v</i>	<i>h</i>	<i>s</i>									
°С	м3/кг	кДж/кг	кДж/(кг·К)									
0	0,0010002	0,0	-0,0001	0,0010002	0,0	-0,0001	0,0010002	0,0	-0,0001	0,0010001	0,2	-0,0001
10	0,0010002	42,1	0,1510	0,0010002	42,1	0,1510	0,0010002	42,1	0,1510	0,0010002	42,2	0,1510
30	0,0010043	125,7	0,4365	0,0010043	125,7	0,4365	0,0010043	125,8	0,4365	0,0010042	125,8	0,4364
40	0,0010078	167,5	0,5721	0,0010078	167,5	0,5721	0,0010078	167,5	0,5721	0,0010077	167,6	0,5720
90	0,0010361	376,9	1,1925	0,0010361	377,0	1,1925	0,0010361	377,0	1,1925	0,0010361	377,0	1,1924
110	2,187	2698,9	7,5239	1,942	2697,8	7,4673	1,745	2696,7	7,4164	0,0010518	461,4	1,4184
120	2,247	2718,8	7,5750	1,995	2717,8	7,5187	1,793	2716,8	7,4681	0,0010606	503,7	1,5276
160	2,484	2797,5	7,7658	2,206	2796,9	7,7103	1,984	2796,2	7,6605	0,9842	2789,5	7,3285
200	2,718	2876,1	7,9393	2,415	2875,6	7,8842	2,172	2875,2	7,8348	1,080	2870,4	7,5073
240	2,952	2955,0	8,0994	2,623	2954,7	8,0445	2,359	2954,3	7,9954	1,175	2950,8	7,6703
280	3,184	3034,6	8,2486	2,829	3034,3	8,1939	2,546	3034,0	8,1449	1,269	3031,2	7,8213
320	3,416	3114,9	8,3888	3,036	3114,7	8,3342	2,732	3114,4	8,2853	1,363	3112,2	7,9626
360	3,648	3196,1	8,5213	3,242	3195,9	8,4668	2,917	3195,7	8,4179	1,456	3193,8	8,0958
400	3,879	3278,3	8,6472	3,448	3278,1	8,5927	3,103	3278,0	8,5439	1,549	3276,4	8,2223
440	4,111	3361,5	8,7672	3,653	3361,3	8,7127	3,288	3361,2	8,6640	1,642	3359,8	8,3427
480	4,342	3445,7	8,8821	3,859	3445,6	8,8276	3,473	3445,4	8,7789	1,735	3444,3	8,4578
520	4,573	3530,9	8,9924	4,065	3530,8	8,9379	3,658	3530,7	8,8892	1,828	3529,7	8,5683
560	4,804	3617,3	9,0986	4,270	3617,2	9,0441	3,843	3617,1	8,9954	1,920	3616,2	8,6748
600	5,035	3704,7	9,2011	4,475	3704,6	9,1466	4,028	3704,5	9,0979	2,013	3703,7	8,7774

Рисунок 5.2 – Фрагмент таблицы «Термодинамические свойства воды и перегретого пара»

Еще более упрощает расчеты использование *i-s* диаграммы (рис. 5.3). Она широко применяется для исследования процессов и циклов водяного пара. С ее помощью по положению точки, соответствующей определенному состоянию пара, можно легко определить значения всех параметров этого пара (*p*, *v*, *t*, *t_n*, *i*, *s*, *x*). Для этого достаточно знать значения двух любых параметров из перечисленных (обычно это давление *p* и температура *t*). Удельная внутренняя энергия определяется по формуле:

$$u = i - pv. \quad (5.7)$$

где

i – удельная энтальпия пара, кДж/кг;

p – давление пара, Па;

v – удельный объем, кг/м³.

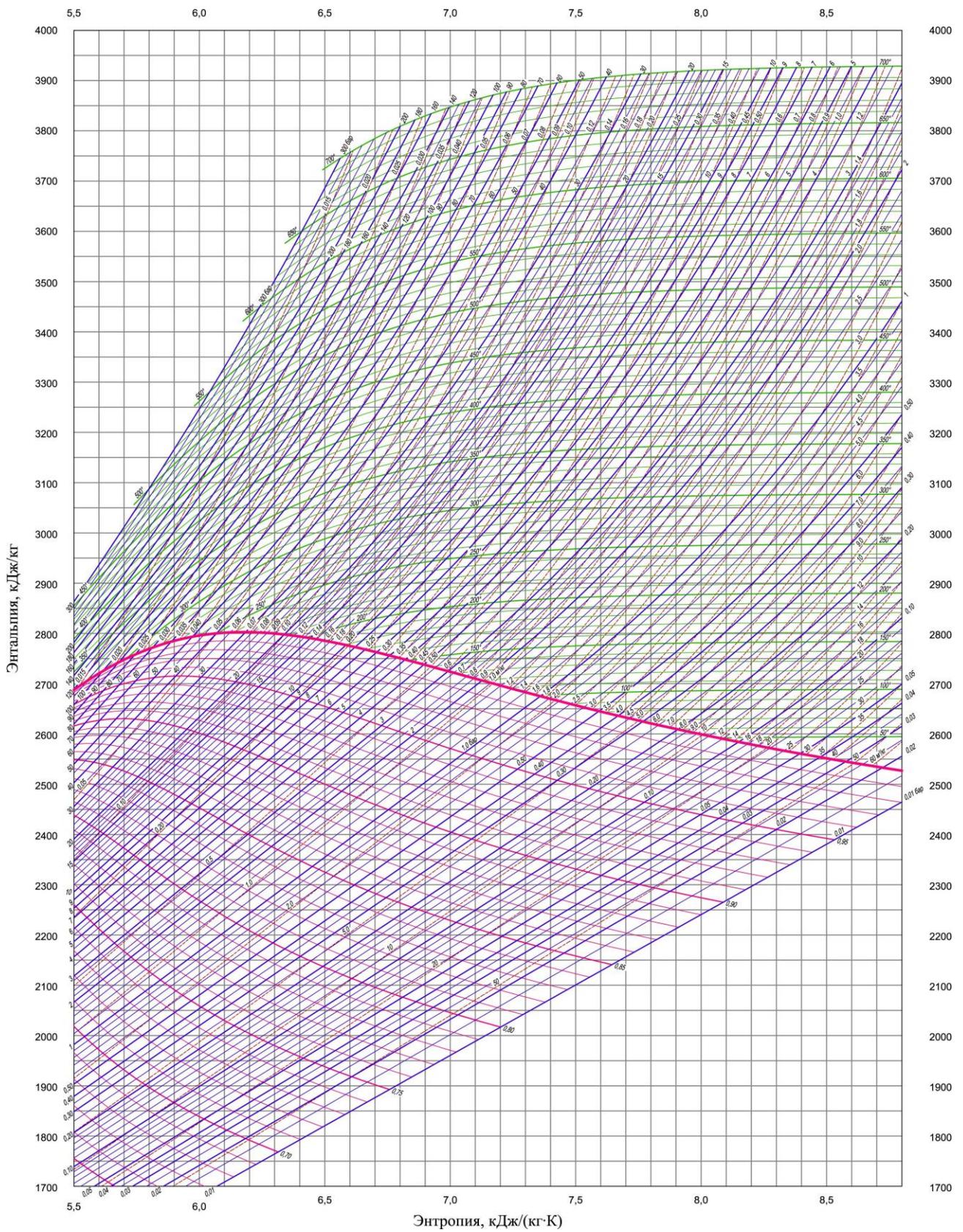


Рисунок 5.3 – Диаграмма i - s водяного пара

На диаграмме утолщенная красная линия соответствует сухому насыщенному пару ($x = 1$). Область, находящаяся ниже этой линии, соответствует влажному пару, а область выше – перегретому пару.

Также на диаграмме (рис. 5.4) представлено семейство изобар (синих линий постоянного давления $p = const$), изохор (красных пунктирных линий постоянного удельного объема $v = const$), изотерм (зеленых линий постоянных температур $t = const$) в области перегретого пара и красных линий постоянной степени сухости в области влажного пара ($x = const$). Вертикальные и горизонтальные линии относятся соответственно к энтропии и энтальпии.

Для удобства работы с диаграммой подписи значений параметров могут дублироваться, при этом они имеют такой же наклон, как и соответствующие им линии.

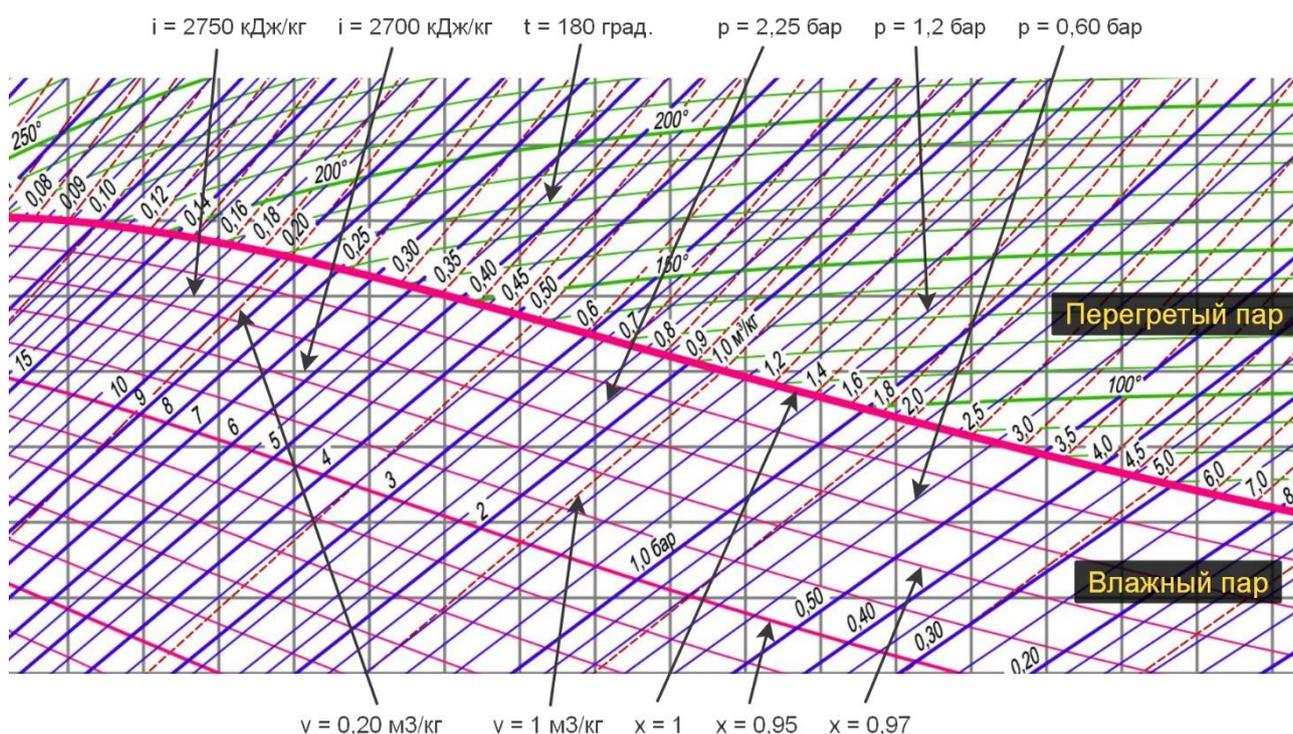


Рисунок 5.4 – Фрагмент диаграмма i - s водяного пара

При определении температуры влажного пара по диаграмме необходимо помнить, что его температура не зависит от степени сухости, т.е. от состояния кипящей воды ($x = 0$) до состояния сухого насыщенного пара ($x = 1$) при постоянном давлении температура пара не меняется и соответствует

температуре насыщения t_n . Таким образом, достаточно найти точку пересечения соответствующей изобары и линии $x = 1$ и определить, какая изотерма приходит в эту точку. Например, давлению 1 бар соответствует $t_n \approx 100$ °С (99,63 °С по таблице), давлению 5 бар – $t_n \approx 152$ °С (151,85 °С по таблице).

Для определения остальных параметров необходимо найти точку, характеризующую состояние пара, например: влажный пар при давлении $p = 7$ бар и степени сухости $x = 0,97$ имеет следующие показатели: $t_n \approx 167$ °С, $i \approx 2700$ кДж/кг, $s \approx 6,57$ кДж/кг·К, $v \approx 0,27$ м³/кг.

В том случае, если в адиабатном процессе (без потерь энергии, т.е. при постоянной энтальпии) снизить давление этого пара до значения $p_2 = 0,5$ бар, он окажется перегретым и будет иметь следующие показатели: $t \approx 109$ °С, $t_n \approx 82$ °С, $i \approx 2700$ кДж/кг, $s \approx 7,74$ кДж/кг·К, $v \approx 3,5$ м³/кг.

5.2. ЗАДАНИЯ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ

Данные задачи предназначены для закрепления знаний, которые получены студентами на лекционных занятиях, посвященных изучению водяного пара, а также на освоение навыков использования таблиц для водяного пара и i - s диаграммы. Каждая задача сопровождается соответствующими пояснениями.

5.1. Вода, находящаяся под давлением 15 бар, нагрета до температуры 190 °С. Наступило ли кипение? Ответ обоснуйте.

Исходные данные для решения задачи № 5.1

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
p , бар	0,06	0,09	0,15	0,5	0,7	0,85	1,5	2,0	6,0	10,0
t , °С	32	41	50	73	84	90	100	110	150	160
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
p , бар	13,0	16,0	18,0	22,0	27,0	40,0	50,0	60,0	70,0	80,0
t , °С	185	193	195	210	225	230	260	270	280	290

Пояснения к решению задачи № 5.1

Задача решается с использованием таблиц для водяного пара в состоянии насыщения. В том случае, если кипение не наступило, необходимо определить, на сколько градусов необходимо нагреть воду, чтобы она закипела.

Ответ: кипение не наступило. $\Delta t = 8,28$ °С.

5.2. Вода (пар), находящаяся под давлением $p = 9$ бар, нагрета до температуры $t = 178$ °С. На сколько градусов нужно нагреть воду (или охладить пар), чтобы она достигла температуры кипения t_n ? Ответ обоснуйте.

Исходные данные для решения задачи № 5.2

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>p</i> , бар	0,5	0,7	0,85	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	6,0	8,0
<i>t</i> , °C	73	94	93	100	114	221	114	112	163	171
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
<i>p</i> , бар	8,5	10,0	12,0	15,0	18,0	20,0	23,0	28,0	40,0	90,0
<i>t</i> , °C	171	175	192	200	210	185	217	237	214	335

Пояснения к решению задачи № 5.2

Задача решается с использованием таблицы для водяного пара в состоянии насыщения.

Ответ: перегретый пар необходимо охладить на 2,64 °C.

5.3. Давление сухого насыщенного пара составляет 10 бар. Определить его температуру, удельный объем, плотность, энтальпию и энтропию двумя способами: пользуясь таблицами для водяного пара и *i-s* диаграммой.

Исходные данные для решения задачи № 5.3

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>p</i> , бар	0,2	0,5	0,9	2	3,5	7	8,5	13	21	29
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
<i>p</i> , бар	30	40	50	35	65	24	14	45	4,5	60

Пояснения к решению задачи № 5.3

Все необходимые значения определяются по таблице для водяного пара в состоянии насыщения. Плотность вычисляется через удельный объем.

При определении этих же параметров по *i-s* диаграмме необходимо найти точку пересечения кривой, соответствующей заданному в условии задачи давлению, и кривой, соответствующей состоянию сухого насыщенного пара

($x = 1$), и по положению этой точки определить необходимые параметры. Плотность, как и в первом случае, вычисляется через удельный объем.

Ответ: $t_n = 179,88$ °С; $v = 0,1943$ м³/кг; $\rho = 5,147$ кг/м³; $i = 2777$ кДж/кг; $s = 6,585$ кДж/ кг·К.

5.4. Перегретый пар находится под давлением 30 бар при температуре 440 °С. Определить его удельный объем, плотность, энтальпию, энтропию и степень перегрева двумя способами: пользуясь таблицами для водяного пара и i - s диаграммой.

Исходные данные для решения задачи № 5.4

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
p , бар	10	0,3	3	5	35	40	50	30	20	10
t , °С	240	200	320	440	320	460	400	280	320	280
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
p , бар	5	4	3	2	1	0,8	0,5	1	5	20
t , °С	180	200	170	200	240	120	200	160	280	400

Пояснения к решению задачи № 5.4

Задача решается с использованием таблицы «Термодинамические свойства воды и перегретого пара». Чтобы вычислить степень перегрева пара, необходимо дополнительно воспользоваться таблицей «Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения» и определить, какая температура насыщения соответствует данному в условии задачи давлению.

Ответ: $v = 0,1061$ м³/кг; $\rho = 9,42$ кг/м³; $i = 3321,9$ кДж/кг; $s = 7,05$ кДж/кг·К; $\Delta t = 206,16$ °С.

5.3. ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

5.5. Определить количество теплоты, затрачиваемой на перегрев 1 кг сухого насыщенного пара до температуры 440 °С при давлении 30 бар.

Исходные данные для решения задачи № 5.5

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>p</i> , бар	20	0,5	5	0,8	1	1	4	3	5	2
<i>t</i> , °С	400	200	280	120	160	240	200	170	180	200
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
<i>p</i> , бар	20	5	30	35	40	10	3	10	0,3	50
<i>t</i> , °С	320	440	280	320	460	240	320	240	200	400

Пояснения к решению задачи № 5.5

Задача решается с использованием таблиц «Термодинамические свойства воды и перегретого пара» и «Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения». Искомое количество теплоты определяется как разность между энтальпией перегретого пара и энтальпией сухого насыщенного пара при заданном давлении: $q = i - i''$.

Ответ: $q = 520$ кДж/кг.

5.6. Через паровую турбину тепловой электростанции за 1 час проходит 51 000 кг пара. После прохождения турбины отработавший пар поступает в конденсатор при давлении $p_k = 0,045$ бар и влажности $x = 89$ %. Для охлаждения пара используется вода, которая на входе в конденсатор имеет начальную температуру 12 °С, а на выходе – 23 °С. Температура полученного конденсата соответствует температуре насыщения.

Определить часовой расход охлаждающей воды G (кг/ч).

Исходные данные для решения задачи № 5.6

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
m , т	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
x , %	92,5	92,8	93,1	93,4	93,7	94,0	94,3	94,6	94,9	95,2
p , бар	35	50	20	10	1	3	20	4	0,3	5
t , °С	320	400	320	240	160	170	400	200	200	280
η , %	95,2	95,4	95,6	95,8	96,0	96,2	96,4	96,6	96,8	97,0
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
m , кг	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0
x , %	95,5	95,8	96,1	96,4	96,7	97,0	97,3	97,6	97,9	98,2
p , бар	10	30	5	0,5	0,8	40	5	2	3	1
t , °С	280	280	180	200	120	460	440	200	320	240
η , %	97,2	97,4	97,6	97,8	98,0	98,2	98,4	98,6	98,8	99,0

Пояснения к решению задачи № 5.6

Рассмотрим процесс следующим образом: имелся влажный пар массой 5000 кг, характеризующийся параметрами $x = 0,99$, $p = 100$ бар, t_n , $i_x \rightarrow$ после подвода определенного количества теплоты Q к пароперегревателю (например, в результате сгорания топлива) получился перегретый пар, характеризующийся параметрами $p = 100$ бар, $t_n = 550$ °С, i . При этом пар воспринял лишь часть подведенной теплоты: $Q_\eta = 0,984 \cdot Q$. Остальная часть ($0,016 \cdot Q$) приходится на теплопотери.

Количество теплоты q_η , которое воспринял каждый килограмм пара, можно определить через разность энтальпий перегретого пара и влажного пара: $q_\eta = i - i_x$. Значение i_x вычисляется по стандартной формуле. Остальные необходимые для расчетов параметры берутся из таблиц для сухого насыщенного и перегретого пара.

Далее последовательно вычисляются значения Q_η и Q .

Ответ: $Q_\eta = 3945$ МДж; $Q = 4009$ МДж.

5.7. В паровом котле находятся 25 м³ воды при давлении 35 бар и температуре насыщения. Какое количество сухого насыщенного пара по массе и объему образовалось бы в котле, если бы давление в нем упало до 1 бар?

Исходные данные для решения задачи № 5.7

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V, \text{ м}^3$	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23
$p_1, \text{ бар}$	160	142	115	136	30	102	27	12	5	25
$p_2, \text{ бар}$	12	8	2	14	18	5	13	0,7	0,5	3
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$V, \text{ м}^3$	27	29	31	33	35	37	39	41	43	45
$p_1, \text{ бар}$	19	26	80	60	132	140	45	31	104	28
$p_2, \text{ бар}$	1,5	4	6	15	7	12	4,5	7,5	11	0,7

Пояснения к решению задачи № 5.7

Сначала по таблице «Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения» определим параметры воды, находящейся в котле при давлении 35 бар: $i' = 1049,8$ кДж/кг, $v' = 0,0012342$ м³/кг, $\rho' = 1/v' = 810,2$ кг/м³.

Таким образом, изначально в котле находилась кипящая вода массой

$$m = \rho' \cdot V,$$

$$m = 810,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 25 \text{ м}^3 = 20255 \text{ кг}.$$

После падения давления до 1 бар (представим, что объем котла увеличился) температура кипения воды снизилась. Если считать данный процесс адиабатным, т.е. протекающим без теплообмена с окружающей средой и без соответствующих теплотерь, можно сделать вывод о том, что энтальпия полученного вещества имеет такое же значение 1049,8 кДж/кг.

Поскольку при давлении 1 бар энтальпия кипящей воды $i' = 417,5$ кДж/кг, а энтальпия сухого насыщенного пара $i'' = 2675,7$ кДж/кг, делаем вывод о том, что полученное вещество является влажным паром, энтальпия которого равна $i_x = 1049,8$ кДж/кг.

Чтобы определить, какая доля в этом паре приходится на сухой насыщенный пар, а какая – на кипящую воду, вычислим степень сухости (необходимые значения берутся из таблицы «Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения»):

$$i_x = i' + x \cdot r,$$

$$x = \frac{i_x - i'}{r},$$

$$x = \frac{1049,8 - 417,5}{2258,2} = 0,28.$$

Полученные результат говорит о том, что в образовавшемся влажном паре 28 % массы приходится на сухой насыщенный пар, а 72 % - на кипящую воду. Тогда масса сухого насыщенного пара равна:

$$m_{\text{п}} = x \cdot m,$$

$$m_{\text{п}} = 0,28 \cdot 20255 \text{ кг} = 5671,4 \text{ кг}.$$

Определив по таблице «Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения» значение удельного объема сухого насыщенного пара при давлении 1 бар, вычислим его объем:

$$V_{\text{п}} = m_{\text{п}} \cdot v'',$$

$$V_{\text{п}} = 5671,4 \text{ кг} \cdot 1,6946 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} = 9611 \text{ м}^3.$$

Ответ: $m_{\text{п}} = 5671,4 \text{ кг}$; $V_{\text{п}} = 9611 \text{ м}^3$.

РАЗДЕЛ 6. ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ

6.1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Атмосферный воздух является газовой смесью, включающей в себя азот, кислород, углекислый газ, небольшое количество инертных газов, а также *водяной пар*. Смесью *сухого воздуха с водяным паром* называется **влажным воздухом**.

В соответствии с законом Дальтона атмосферное давление влажного воздуха B определяется по формуле:

$$B = p_{\text{с.в.}} + p_{\text{п}}, \quad (6.1)$$

где $p_{\text{с.в.}}$ и $p_{\text{п}}$ – парциальные давления соответственно сухого воздуха и водяного пара.

Пар, содержащийся в воздухе, может быть либо *сухим насыщенным*, либо *перегретым*.

Если пар в воздухе является *сухим насыщенным*, то и воздух является **насыщенным**. Такой воздух содержит максимальное количество водяного пара для данной температуры и давления, а его относительная влажность $\varphi = 100 \%$.

Если пар в воздухе является *перегретым*, то такой воздух называют **ненасыщенным** ($\varphi < 100 \%$).

Абсолютная влажность $\rho_{\text{п}}$ (г/м^3 или кг/м^3) – это масса пара, которая содержится в 1 м^3 влажного воздуха. Абсолютная влажность равна плотности пара при его парциальном давлении и температуре воздуха. Для насыщенного воздуха определяется по таблицам для *насыщенного водяного пара*, для ненасыщенного воздуха – по таблицам для *перегретого водяного пара*.

Относительная влажность φ – это отношение абсолютной влажности ненасыщенного воздуха $\rho_{\text{п}}$ при данной температуре к абсолютной влажности насыщенного воздуха $\rho_{\text{н}}$ при той же температуре. Измеряется в долях или в процентах (например, $\varphi = 1 = 100 \%$):

$$\varphi = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{н}}} \approx \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{н}}} \quad \text{или} \quad \varphi = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{н}}} \cdot 100 \approx \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{н}}} \cdot 100. \quad (6.2)$$

где $p_{\text{н}}$ – парциальное давление насыщенного водяного пара в насыщенном воздухе ($\varphi = 1$), т.е. это максимально возможное значение $p_{\text{п}}$ при температуре влажного воздуха. Значение $p_{\text{н}}$ определяется по таблицам для *насыщенного водяного пара*.

Также относительная влажность может быть вычислена через влагосодержание d и влагоемкость d_{max} :

$$\varphi = \frac{d \cdot (0,622 + d_{\text{max}})}{d_{\text{max}} \cdot (622 + d)}. \quad (6.3)$$

Влагосодержание d (г/кг с.в.) – это масса пара, которая приходится на 1 кг сухого воздуха:

$$d = 622 \cdot \frac{p_{\text{п}}}{B - p_{\text{п}}} = 622 \cdot \frac{\varphi p_{\text{н}}}{B - \varphi p_{\text{н}}}, \quad \frac{\text{г}}{\text{кг с. в.}}. \quad (6.4)$$

Значение относительной влажности φ в выражении (6.4) указывается в долях ($\varphi = 0 \dots 1$); значения $p_{\text{н}}$ и B – в любых одинаковых единицах измерения, поскольку они взаимно сокращаются.

Влагоемкость d_{max} (г/кг с.в.) – это максимальное для данной температуры влагосодержание (при $\varphi = 1$):

$$d_{\text{max}} = 622 \cdot \frac{p_{\text{н}}}{B - p_{\text{н}}}, \quad \frac{\text{г}}{\text{кг с. в.}}. \quad (6.5)$$

Газовая постоянная влажного воздуха $R_{\text{вл.в.}}$ (Дж/кг·°С):

$$R_{\text{вл.в.}} = \frac{8314}{\mu_{\text{вл.в.}}} = \frac{8314}{28,95 - 10,934 \cdot \varphi \cdot \frac{p_{\text{н}}}{B}}. \quad (6.6)$$

Объем влажного воздуха $V_{\text{вл.в.}}$ ($\text{м}^3/\text{кг с.в.}$), приходящегося на 1 кг сухого воздуха:

$$V_{\text{вл.в.}} = \frac{R_{\text{вл.в.}} \cdot T}{B}, \quad (6.7)$$

где

$R_{\text{вл.в.}}$ – газовая постоянная влажного воздуха ($\text{Дж}/\text{кг}\cdot^\circ\text{C}$);

T – температура влажного воздуха (К);

B – атмосферное давление (Па).

Энтальпия влажного воздуха $i_{\text{вл.в.}}$ ($\text{кДж}/\text{кг с.в.}$) относится к 1 кг сухого воздуха и широко используется при расчетах сушильных установок, например, для определения количества теплоты, расходуемой на испарение влаги из подсушиваемых материалов:

$$i_{\text{вл.в.}} = 1,0048 \cdot t + \frac{d}{1000} \cdot (2500 + 1,96 \cdot t), \quad (6.8)$$

где

d – влагосодержание ($\text{г}/\text{кг с.в.}$);

t – температура воздуха ($^\circ\text{C}$).

Рассмотрим таблицу «*Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения*» (рис. 6.1). Она используется при исследованиях насыщенного влажного воздуха.

Например, в насыщенном влажном воздухе ($\varphi = 1$) температурой $t = 17^\circ\text{C}$ парциальное давление насыщенного пара $p_n = 0,019364 \text{ бар} = 1936 \text{ Па}$, его удельный объем $v'' = 69,087 \text{ м}^3/\text{кг}$, абсолютная влажность (плотность) $\rho_{\text{п}} = 1 / 69,087 \text{ м}^3/\text{кг} = 14,5 \text{ г}/\text{м}^3$. Это означает, что при данных условиях в 1 м^3 насыщенного влажного воздуха содержится $14,5 \text{ г}$ пара (влаги).

t_s	P_s	v'	v''	h'	h''	r	s'	s''
°C	бар	м ³ /кг	м ³ /кг	кДж/кг	кДж/кг	кДж/кг	кДж/(кг·К)	кДж/(кг·К)
0	0,006108	0,0010002	206,32	-0,04	2501,0	2501,0	-0,0002	9,1565
0,01	0,006112	0,0010002	206,20	0,000614	2501,0	2501,0	0,0000	9,1560
1	0,006566	0,0010002	192,61	4,17	2502,8	2498,6	0,0152	9,1298
2	0,007054	0,0010001	179,94	8,39	2504,7	2496,3	0,0306	9,1035
3	0,007575	0,0010001	168,17	12,60	2506,5	2493,9	0,0459	9,0773
4	0,008129	0,0010000	157,27	16,80	2508,3	2491,5	0,0611	9,0514
5	0,008718	0,0010000	147,17	21,01	2510,2	2489,2	0,0762	9,0258
6	0,009346	0,0010000	137,768	25,21	2512,0	2486,8	0,0913	9,0003
7	0,010012	0,0010001	129,061	29,41	2513,9	2484,5	0,1063	8,9751
8	0,010721	0,0010001	120,952	33,60	2515,7	2482,1	0,1213	8,9501
9	0,011473	0,0010002	113,423	37,80	2517,5	2479,7	0,1362	8,9254
10	0,012271	0,0010003	106,419	41,99	2519,4	2477,4	0,1510	8,9009
11	0,013118	0,0010003	99,896	46,19	2521,2	2475,0	0,1658	8,8766
12	0,014015	0,0010004	93,828	50,38	2523,0	2472,6	0,1805	8,8525
13	0,014967	0,0010006	88,165	54,57	2524,9	2470,2	0,1952	8,8286
14	0,015974	0,0010007	82,893	58,75	2526,7	2467,9	0,2098	8,8050
15	0,017041	0,0010008	77,970	62,94	2528,6	2465,7	0,2243	8,7815
16	0,018170	0,0010010	73,376	67,13	2530,4	2463,3	0,2388	8,7583
17	0,019364	0,0010012	69,087	71,31	2532,2	2460,9	0,2533	8,7353

Рисунок 6.1 – Фрагмент таблицы «Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по температуре)»

Для определения параметров пара в ненасыщенном воздухе ($\varphi < 1$) пользуются таблицей «Термодинамические свойства воды и перегретого пара» (рис. 5.2).

Также для расчетов, связанных с влажным воздухом, широко применяется $i-d$ диаграмма, один из вариантов которой представлен на рисунке 6.2. Особенностью диаграммы является то, что она построена в системе координат с углом между осями 135° , поэтому линии постоянной энтальпии на диаграмме располагаются под углом 45° .

С помощью $i-d$ диаграммы по положению точки, соответствующей определенному состоянию влажного воздуха, можно определить значения всех параметров этого воздуха (энтальпию i , относительную влажность φ , влагосодержание d , влагоемкость d_{\max} , парциальное давление пара p_p , температуры соответственно мокрого и сухого термометров t_m и t_c). Для этого достаточно знать значения двух любых параметров из перечисленных (обычно это параметры t_m и t_c).

Подписи значений параметров могут дублироваться, при этом они имеют такой же наклон, как и соответствующие им линии.

Значения для параметра t_c указываются слева (ось ординат). Здесь же приводятся значения энтальпии, расположенные под углом 45° .

Значения для параметра t_m приводятся возле кривой $\varphi = 100\%$. Им соответствуют пунктирные линии, незначительно отличающиеся по своему наклону от линий энтальпии.

Линии относительной влажности имеют дугообразную форму с подписями в правой части диаграммы (в процентах).

Значения влагосодержания и влагоемкости указаны внизу (ось абсцисс). При этом значение влагоемкости определяется по температуре влажного термометра – находится точка пересечения линии, соответствующей значению параметра t_m и линии $\varphi = 100\%$. Значение влагосодержания d , соответствующее этой точке, является влагоемкостью d_{max} .

Значения парциального давления пара приведены в нижней правой части диаграммы, и для определения данного параметра построена вспомогательная наклонная линия. Для определения значения параметра $p_{п}$ необходимо из соответствующей состоянию влажного воздуха точки опустить перпендикуляр до вспомогательной линии, а затем к нему восстановить второй перпендикуляр (данный процесс изображен на рисунке для точки А).

Например:

точке В соответствуют температуры $t_m \approx 24^\circ\text{C}$ и $t_c \approx 48^\circ\text{C}$, энтальпия $i_B \approx 70$ Дж/кг с.в., относительная влажность $\varphi_B \approx 13\%$, влагосодержание $d_B \approx 9,3$ г/кг с.в., влагоемкость $d_{max,B} \approx 19$ г/кг с.в., парциальное давление пара $p_{п,B} \approx 11$ мм рт.ст.

точке С соответствуют температуры $t_m \approx 27,8^\circ\text{C}$ и $t_c \approx 46^\circ\text{C}$, энтальпия $i_C \approx 88$ Дж/кг с.в., относительная влажность $\varphi_C \approx 26\%$, влагосодержание $d_C \approx 16,5$ г/кг с.в., влагоемкость $d_{max,C} \approx 24,5$ г/кг с.в., парциальное давление пара $p_{п,C} \approx 18$ мм рт.ст.

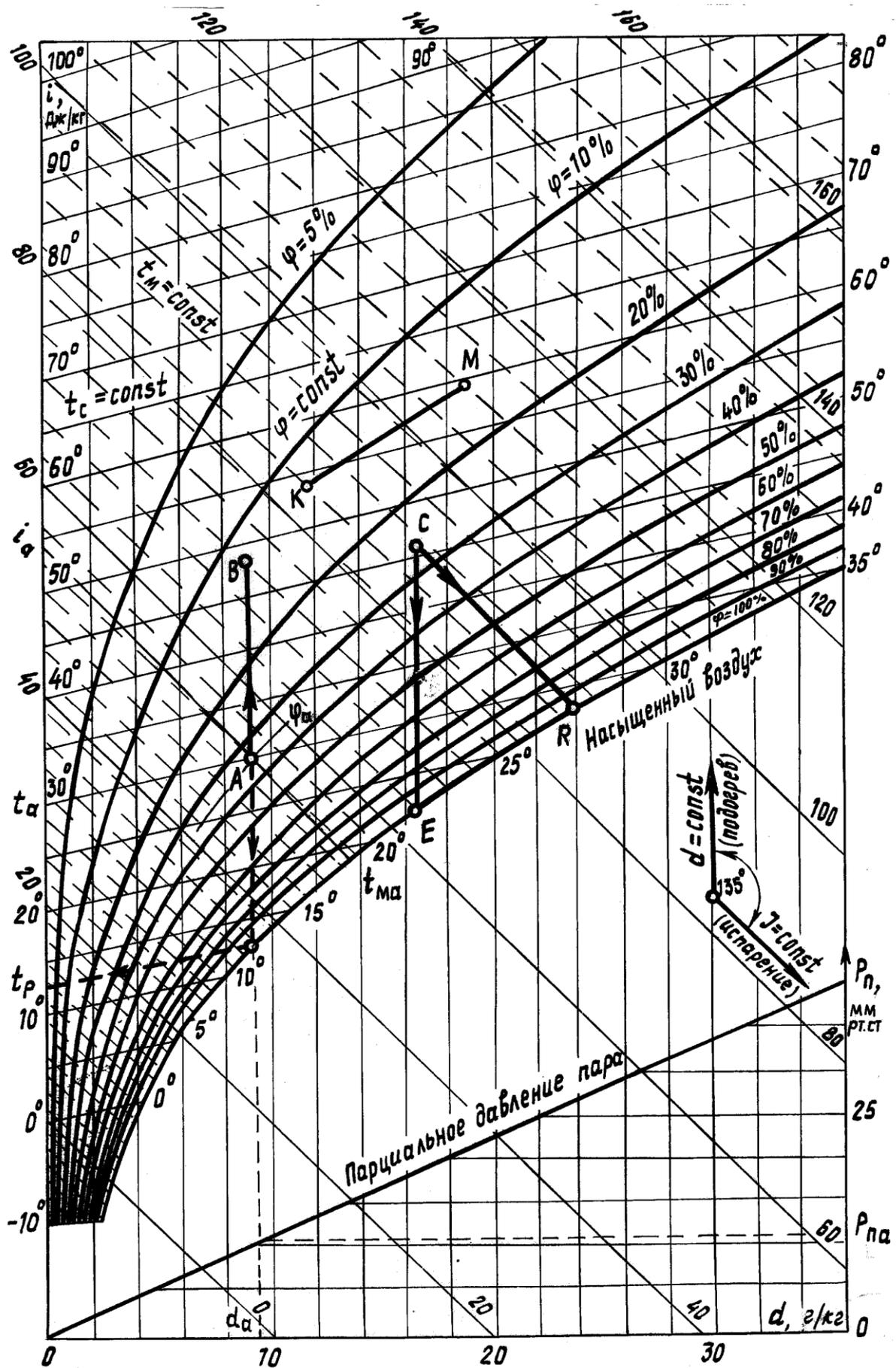


Рисунок 6.2 – Диаграмма i - d влажного воздуха

Процесс $A-B$ является нагревом воздуха без дополнительного поступления влаги, т.е. влагосодержание $d = 9,3$ г/кг с.в. = $const$. При этом в результате повышения температуры воздуха от 30 до 48 °С его влагоемкость увеличивается от 13,5 до 19 г/кг с.в., что приводит к уменьшению относительной влажности от 35 до 13 %, т.е. воздух высушивается.

Процесс $C-E$ является охлаждением воздуха от 46 до 22 °С, при этом точке E соответствует температура точки росы $t_p = 22$ °С. При дальнейшем охлаждении воздух будет оставаться насыщенным, а его влагосодержание будет снижаться (процесс протекает по линии $\varphi = 100$ %). Таким образом можно уменьшить количество исходной влаги в воздухе, что широко применяется, например, в процессах кондиционирования воздуха.

Процесс $C-R$ соответствует увлажнению воздуха без потерь теплоты (адиабатный процесс сушки в идеальной сушилке при $i = const$), поэтому он изображается под углом в 45°, т.е. параллельно линиям энтальпии. Разность влагосодержаний $d_R - d_c = 24 - 16,5 = 7,5$ г/кг с.в. представляет собой количество влаги, которое поглотил каждый килограмм сухого воздуха.

6.2. ЗАДАНИЯ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ

Данные задания направлены на закрепление знаний, полученных студентами на лекционных занятиях, посвященных изучению влажного воздуха, а также на освоение навыков использования таблиц для водяного пара и $i-d$ диаграммы. Каждая задача сопровождается соответствующими пояснениями. При решении задач необходимо:

- записывать формулы, которые используются для расчетов;
- при необходимости приводить расшифровку параметров, входящих в формулы, с указанием единиц измерения;
- приводить все математические преобразования при выводе рабочих формул;
- приводить все вычисления с указанием единиц измерения;
- приводить пояснения и комментарии к формулам, выбранным табличным данным, ответам и т.д. (например: "определим относительную влажность воздуха в состоянии 1", "значение параметра p_n определим по таблице для насыщенного водяного пара при температуре $t = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ ", "таким образом, за 1 час в камеру сгорания двигателя поступает 4,6 кг влаги" и т.д.);
- изображать графически (в виде рисунков, схем и т.д.) условия задач.

6.1. Определить относительную и абсолютную влажность воздуха, находящегося в техническом помещении размерами $5,5 \cdot 6,5 \cdot 2,7$ м, если парциальное давление пара в нем $p_n = 15$ кПа, а температура $t = 80 \text{ }^\circ\text{C}$. Какое максимально возможное количество влаги способен принять в себя воздух при условии, что его температура останется постоянной?

Исходные данные для решения задачи № 6.1

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_n, \text{ м}^3$	79	112	164	88	105	134	108	96	117	126
$p_n, \text{ кПа}$	1,0	1,5	3,5	4,0	3,0	6,0	6,5	2,0	5,0	7,0
$t, \text{ }^\circ\text{C}$	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110

Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$V_{\text{п}}, \text{м}^3$	218	156	206	171	129	91	85	167	142	98
$p_{\text{п}}, \text{кПа}$	1,5	1,0	5,5	2,0	5,0	7,0	5,5	3,0	4,0	6,0
$t, \text{°C}$	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110

Пояснения к решению задачи № 6.1

Поскольку абсолютная влажность представляет собой плотность водяных паров, содержащихся в воздухе, вычислим ее по формуле:

$$\rho_{\text{п}} = \frac{1}{v_{\text{п}}}, \quad (1)$$

где $v_{\text{п}}$ – удельный объем пара, содержащегося в воздухе, $\text{м}^3/\text{кг}$.

Чтобы определить значение $v_{\text{п}}$ по таблицам, необходимо выяснить, каким является пар в воздухе – сухим насыщенным или перегретым. Определим по таблице для насыщенного водяного пара (рис. 6.3) парциальное давление сухого насыщенного пара в насыщенном воздухе ($\varphi = 100\%$) при температуре 80 °C : $p_{\text{н}} = 0,47359$ бар.

t_s	P_s	v'	v''	h'	h''	r	s'	s''
45	0,095817	0,0010099	15,278	188,35	2394,5	2394,5	0,6383	8,1655
50	0,123350	0,0010121	12,048	209,26	2382,5	2382,5	0,7035	8,0771
55	0,157400	0,0010145	9,5812	230,17	2600,7	2370,5	0,7677	7,9922
60	0,199190	0,00101712	7,6807	251,09	2609,5	2358,4	0,8310	7,9106
64	0,239100	0,0010193	6,4711	267,84	2616,4	2348,6	0,8809	7,8475
65	0,250080	0,0010199	6,2042	272,02	2618,2	2346,2	0,8933	7,8320
70	0,311610	0,0010228	5,0479	292,97	2626,8	2333,8	0,9548	7,7565
75	0,36963	0,0010253	4,3015	309,74	2633,6	2323,9	1,0034	7,6980
80	0,47359	0,0010292	3,4104	334,92	2643,8	2308,9	1,0752	7,6135
85	0,57803	0,0010326	2,8300	355,92	2652,1	2296,2	1,1343	7,5459
90	0,70108	0,0010361	2,3624	376,94	2660,3	2283,4	1,1925	7,7805
95	0,84525	0,0010398	1,9832	397,99	2668,4	2270,4	1,2500	7,4174
100	1,01325	0,0010434	1,6738	419,06	2676,3	2257,2	1,3069	7,73564

Рисунок 6.3 – Фрагмент таблицы «Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по температуре)»

Поскольку $p_{\text{п}} < p_{\text{н}}$ ($15 \text{ кПа} = 0,15 \text{ бар} < 0,47359 \text{ бар}$), делаем вывод о том, что пар в воздухе является перегретым, а сам воздух является ненасыщенным ($\varphi < 100 \%$).

Относительную влажность φ вычислим по формуле:

$$\varphi = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{н}}}, \quad (2)$$

$$\varphi = \frac{0,15 \text{ бар}}{0,47359 \text{ бар}} = 0,32 = 32 \% .$$

Чтобы определить величину абсолютной влажности $\rho_{\text{п}}$, найдем значение удельного объема по таблицам для перегретого пара (рис. 6.4).

	p = 0,09 бар			p = 0,10 бар			p = 0,20 бар			p = 0,30 бар		
t	v	h	s	v	h	s	v	h	s	v	h	s
°C	м³/кг	кДж/кг	кДж/(кг·К)									
0	0,0010002	0,0	-0,0001	0,0010002	0,0	-0,0001	0,0010002	0,0	-0,0001	0,0010002	0,0	-0,0001
20	0,0010017	83,9	0,2963	0,0010017	83,9	0,2963	0,0010017	83,9	0,2963	0,0010017	83,9	0,2963
40	0,0010078	167,4	0,5721	0,0010078	167,4	0,5721	0,0010078	167,5	0,5721	0,0010078	167,5	0,5721
50	16,53	2592,6	8,2243	14,87	2592,3	8,1752	0,0010121	209,3	0,7035	0,0010121	209,3	0,7035
60	17,05	2611,5	8,2821	15,34	2611,3	8,2331	0,0010171	251,1	0,8310	0,0010171	251,1	0,8310
80	18,08	2649,4	8,3927	16,27	2649,3	8,3437	8,119	2647,8	8,0205	5,402	2646,3	7,8301
120	20,14	2725,5	8,5967	18,12	2725,4	8,5479	9,052	2724,4	8,2261	6,027	2723,5	8,0371
160	22,20	2802,1	8,7822	19,98	2802,0	8,7334	9,980	2801,3	8,4124	6,649	2800,7	8,2241
200	24,25	2879,4	8,9528	21,82	2879,3	8,9041	10,907	2878,8	8,5834	7,268	2878,4	8,3956

Рисунок 6.4 – Фрагмент таблицы «Термодинамические свойства воды и перегретого пара»

При температуре $t = 80 \text{ °C}$ и давлении $p_{\text{п}} = 0,15 \text{ бар}$ удельный объем $v_{\text{п}} = 12,2 \text{ м}^3/\text{кг}$. Тогда:

$$\rho_{\text{п}} = \frac{1}{v_{\text{п}}} = \frac{1}{12,2 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}} = 0,082 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} = 82 \frac{\text{г}}{\text{м}^3} .$$

Полученное значение говорит о том, что в 1 м^3 воздуха, находящегося в помещении, содержится 82 г пара (влаги). Вычислим общее количество пара $m_{\text{п}}$, находящегося в помещении объемом $V_{\text{п}}$.

$$m_{\text{п}} = \rho_{\text{п}} \cdot V_{\text{п}} , \quad (3)$$

$$m_{\text{п}} = \rho_{\text{п}} \cdot V_{\text{п}} = 0,082 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot (5,5 \cdot 6,5 \cdot 2,7) \text{ м}^3 = 7,91 \text{ кг} .$$

Чтобы определить, какое количество влаги Δm способен принять в себя находящийся в помещении воздух при $t = \text{const}$, воспользуемся формулой:

$$\Delta m = m_{\text{н}} - m_{\text{п}} , \quad (4)$$

где $m_{\text{н}}$ – масса сухого насыщенного пара, содержащегося в помещении с насыщенным воздухом при $\varphi = 100 \%$ и $t = 80 \text{ }^\circ\text{C}$, кг.

$$m_{\text{н}} = \rho_{\text{н}} \cdot V_{\text{п}} , \quad (5)$$

где $\rho_{\text{н}}$ – плотность сухого насыщенного пара во влажном воздухе, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Значение $\rho_{\text{н}}$ определяется по *таблице для насыщенного водяного пара* (рис. 6.3) через удельный объем и при температуре $t = 80 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\rho_{\text{н}} = 1 / 3,41 \text{ м}^3 / \text{кг} = 0,29 \text{ кг} / \text{м}^3 .$$

Тогда

$$m_{\text{н}} = 0,29 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot (5,5 \cdot 6,5 \cdot 2,7) \text{ м}^3 = 27,99 \text{ кг} .$$

Подставляя это значение в формулу (4), получаем:

$$\Delta m = 27,99 \text{ кг} - 7,91 \text{ кг} = 20,08 \text{ кг} .$$

Таким образом, чтобы изменить влажность находящегося в помещении воздуха от $\varphi = 32 \%$ до $\varphi = 100 \%$ при неизменной температуре $t = 80 \text{ }^\circ\text{C}$, необходимо, чтобы в данном помещении испарилось 20,08 кг влаги.

Поскольку на испарение воды затрачивается большое количество энергии ($\approx 2200 \text{ кДж}/\text{кг}$), для поддержания постоянной температуры в помещении потребуется дополнительный подвод тепла, в противном случае температура воздуха будет снижаться по мере испарения влаги.

Ответ: $\varphi = 32 \%$; $\rho_{\text{п}} = 82 \text{ г}/\text{м}^3$; $\Delta m = 20,08 \text{ кг}$.

6.2. В воздухе температурой 80 °С находится пар, парциальное давление которого составляет 0,2 бар. Чему равна относительная влажность воздуха?

Исходные данные для решения задачи № 6.2

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p_{\text{п}}, \text{кПа}$	6,0	5,0	5,5	7,0	1,0	3,0	1,5	5,5	4,0	2,0
$t, \text{°C}$	110	60	80	70	30	90	20	40	100	50
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$p_{\text{п}}, \text{кПа}$	5,0	6,5	2,0	3,0	7,0	6,0	4,0	3,5	1,5	1,0
$t, \text{°C}$	100	80	90	60	110	70	50	40	30	20

Пояснения к решению задачи № 6.2

Задачу следует решать по аналогии с предыдущим примером. При этом относительную влажность воздуха необходимо вычислить по двум формулам и сравнить полученные результаты:

$$\varphi = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{н}}}, \quad (1)$$

$$\varphi = \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{н}}}. \quad (2)$$

Чтобы вычислить относительную влажность φ по формуле (1), достаточно найти по *таблице для насыщенного пара* значение парциального давления $p_{\text{н}}$.

Значения параметров $\rho_{\text{п}}$ и $\rho_{\text{н}}$ определяются соответственно по *таблицам для перегретого пара и для насыщенного пара* через удельный объем.

Ответ: $\varphi = 42,2 \%$; $\varphi = 42,0 \%$.

6.3. Состояние влажного воздуха характеризуется температурой $t = 25 \text{ °C}$ и относительной влажностью $\varphi = 0,8$. Атмосферное давление $B = 745 \text{ мм рт.ст.}$ Найти парциальное давление пара и его влагосодержание расчетным путем и с помощью *i-d* диаграммы.

Исходные данные для решения задачи № 6.3

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t, ^\circ\text{C}$	10	25	70	55	50	40	45	15	75	65
φ	0,43	0,29	0,71	0,46	0,91	0,54	0,82	0,11	0,03	0,28
$B, \text{мм рт.ст.}$	731	752	761	748	739	754	736	743	755	746
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$t, ^\circ\text{C}$	45	30	15	25	50	20	35	40	10	55
φ	0,65	0,56	0,74	0,48	0,17	0,51	0,62	0,34	0,89	0,94
$B, \text{мм рт.ст.}$	743	761	742	752	746	741	755	748	754	739

Пояснения к решению задачи № 6.3

При решении задачи следует пользоваться стандартными формулами и таблицами для насыщенного водяного пара.

Ответ: $p_{\text{п}} = 2,53 \text{ кПа}$; $d = 16,3 \text{ г/кг с.в.}$

6.3. ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

6.4. В камеру сгорания двигателя за 1 час работы поступает 500 м^3 воздуха при температуре $t = 25 ^\circ\text{C}$ и относительной влажности $\varphi = 40 \%$. Какое количество влаги поступает в камеру сгорания за 1 час?

Исходные данные для решения задачи № 6.4

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V, \text{м}^3$	570	320	640	410	560	830	310	780	430	550
$t, ^\circ\text{C}$	12	21	24	14	17	11	16	20	24	18
$\varphi, \%$	17	51	89	94	62	74	56	65	48	34
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$V, \text{м}^3$	340	670	750	290	480	620	730	370	860	590
$t, ^\circ\text{C}$	30	34	26	41	19	17	24	27	31	23
$\varphi, \%$	29	46	03	54	28	91	11	43	71	82

Пояснения к решению задачи № 6.4

Массу пара (влаги) $m_{\text{п}}$, содержащегося в воздухе объемом 500 м^3 , можно определить, предварительно вычислив его плотность (абсолютную влажность) $\rho_{\text{п}}$. Объем пара $V_{\text{п}}$ при этом известен и равен объему воздуха, поступающего в камеру сгорания за 1 час.

Необходимые для вычислений значения следует брать из таблиц для насыщенного водяного пара.

Ответ: $m_{\text{п}} = 4,6 \text{ кг}$.

6.5. В сушильную установку помещен материал, от которого нужно отнять 3000 кг влаги. Температура наружного воздуха перед входом в установку $t_1 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$, а его относительная влажность $\varphi_1 = 0,4$. Этот воздух подается вентилятором в камеру нагрева и далее поступает в сушильную камеру, на выходе из которой его состояние характеризуется температурой $t_2 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ и относительной влажностью $\varphi_2 = 0,85$. Атмосферное давление $B = 745 \text{ мм рт.ст.}$ Определить объем воздуха, который необходимо пропустить через сушильную установку.

Исходные данные для решения задачи № 6.5

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$m_{\text{вл}}$, кг	1500	1550	1600	1650	1700	1750	1800	1850	1900	1950
t_1 , $^\circ\text{C}$	18	34	26	22	19	25	24	27	31	23
φ_1	0,29	0,46	0,03	0,54	0,28	0,91	0,11	0,43	0,71	0,82
t_2 , $^\circ\text{C}$	33	39	30	35	31	38	34	36	32	37
φ_2	0,87	0,80	0,91	0,84	0,86	0,93	0,88	0,81	0,92	0,89
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$m_{\text{вл}}$, кг	2000	2050	2100	2150	2200	2250	2300	2350	2400	2450
t_1 , $^\circ\text{C}$	12	21	30	14	17	11	16	20	24	18
φ_1	0,17	0,51	0,89	0,94	0,62	0,74	0,56	0,65	0,48	0,34
t_2 , $^\circ\text{C}$	47	50	41	45	42	49	44	48	46	43
φ_2	0,86	0,83	0,81	0,87	0,89	0,80	0,82	0,90	0,84	0,88

Пояснения к решению задачи № 6.5

Определим, какое количество влаги в граммах отнимает каждый килограмм сухого воздуха, проходя через сушильную камеру, т.е. определим изменение влагосодержания Δd . Для этого вычислим значения d_1 и d_2 по следующей формуле:

$$d = 622 \frac{\varphi p_{\text{H}}}{B - \varphi p_{\text{H}}}, \frac{\text{Г}}{\text{КГ С. В.}} \quad (1)$$

Значения p_{H} для 1-го и 2-го состояний воздуха определим по *таблице для насыщенного водяного пара*:

- при $t_1 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ $p_{\text{H}_1} = 1228 \text{ Па}$;

- при $t_2 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ $p_{\text{H}_2} = 7375 \text{ Па}$.

Подставим необходимые значения в формулу (1) и вычислим d_1 и d_2 :

$$d_1 = 622 \cdot \frac{0,4 \cdot 1228}{745 \cdot 133,32 - 0,4 \cdot 1228} = 3,1 \frac{\text{Г}}{\text{КГ С. В.}}$$

$$d_2 = 622 \cdot \frac{0,85 \cdot 7375}{745 \cdot 133,32 - 0,85 \cdot 7375} = 41,9 \frac{\text{Г}}{\text{КГ С. В.}}$$

Тогда

$$\Delta d = d_2 - d_1 = 41,9 - 3,1 = 38,8 \text{ Г/КГ С.В.}$$

Таким образом, каждый килограмм сухого воздуха, проходя через сушильную камеру, отнимает у высушиваемого материала 38,8 грамм влаги. Тогда для испарения 3000 кг влаги через сушильную установку необходимо пропустить:

$$m_{\text{с.в.}} = \frac{m_{\text{вл}}}{\Delta d} = \frac{3000 \text{ КГ}}{0,038 \frac{\text{КГ}}{\text{КГ С. В.}}} = 77320 \text{ КГ сухого воздуха.}$$

Определим, какой объем влажного наружного воздуха $V_{\text{вл.в.1}}$ приходится на 1 кг сухого воздуха. Для этого предварительно вычислим газовую постоянную влажного наружного воздуха:

$$R_1 = \frac{8314}{28,95 - 10,934 \cdot \varphi \cdot \frac{p_{H_1}}{B}}. \quad (2)$$

$$R_1 = \frac{8314}{28,95 - 10,934 \cdot 0,4 \cdot \frac{1228}{99323}} = 287,7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Тогда

$$V_{\text{вл.в.1}} = \frac{R_1 \cdot T_1}{B}. \quad (3)$$

$$V_{\text{вл.в.1}} = \frac{287,7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 283 \text{ К}}{99323 \text{ Па}} = 0,82 \frac{\text{м}^3}{\text{кг с. в.}},$$

Осуществим проверку полученных единиц измерения:

$$\frac{\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot \text{К}}{\text{Па}} = \frac{\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{кг}}}{\frac{\text{Н}}{\text{м}^2}} = \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

Полученный результат говорит о том, что во влажном наружном воздухе (при $t_1 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\varphi_1 = 0,4$) объемом $0,82 \text{ м}^3$ содержится 1 кг сухого воздуха.

Тогда общий объем наружного воздуха, который нужно направить в сушильную установку, можно вычислить по формуле:

$$V_1 = m_{\text{с.в.}} \cdot V_{\text{вл.в.1}}. \quad (4)$$

$$V_1 = 77320 \text{ кг с. в.} \cdot 0,82 \frac{\text{м}^3}{\text{кг с. в.}} = 63402 \text{ м}^3.$$

Ответ: $V_1 = 63402 \text{ м}^3$.

6.6. Во влажный воздух при начальной температуре $t_1 = 75 \text{ }^\circ\text{C}$ и влажности $\varphi_1 = 10 \text{ \%}$ испаряется влага в условиях отсутствия теплообмена (адиабатный процесс). Температура воздуха при этом понижается до значения $t_2 = 45 \text{ }^\circ\text{C}$. Атмосферное давление $B = 745 \text{ мм рт.ст.}$ Определить относительную влажность φ_2 и влагосодержание d_2 . Эту же задачу решить с использованием $i-d$ диаграммы.

Исходные данные для решения задачи № 6.6

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_1, \text{°C}$	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
φ_1	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15
$t_2, \text{°C}$	18	23	25	19	21	20	22	26	24	27
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$t_1, \text{°C}$	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
φ_1	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
$t_2, \text{°C}$	30	28	32	29	31	35	37	33	36	34

Пояснения к решению задачи № 6.6

Поскольку в условии задачи указано, что испарение влаги происходит в условиях отсутствия теплообмена с окружающей средой, т.е. за счет внутренней энергии самого воздуха, энтальпия сохраняет свое значение. При этом уменьшение температуры воздуха компенсируется повышением его влажности – в воздух попадает дополнительный пар. Тогда:

$$i_1 = i_2 = i_{\text{вл.в.}} = 1,0048 \cdot t_1 + \frac{d_1}{1000} \cdot (2500 + 1,96 \cdot t_1) \quad (1)$$

Чтобы определить значение энтальпии $i_{\text{вл.в.}}$ по формуле (1), вычислим влагосодержание d_1 :

$$d = 622 \cdot \frac{\varphi p_{\text{H}}}{B - \varphi p_{\text{H}}} \quad (2)$$

Из таблиц для *насыщенного водяного пара* находим значение $p_{\text{H}_1} = 38550$ Па (при $t_1 = 75 \text{ °C}$). Подставляя соответствующие значения с индексом "1" в формулу (2), получим:

$$d_1 = 622 \cdot \frac{0,1 \cdot 38550}{745 \cdot 133,32 - 0,1 \cdot 38550} = 25,1 \frac{\text{г}}{\text{кг с. в.}}$$

Вычислим энтальпию по формуле (1):

$$i_{\text{вл.в.}} = 1,0048 \cdot 75 + \frac{25,1}{1000} \cdot (2500 + 1,96 \cdot 75) = 141,8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг с. в.}}$$

Значение влагосодержания d_2 можно вычислить при помощи формулы (1), предварительно заменив индексы "1" на индексы "2" и выразив d_2 :

$$d_2 = \frac{(i_{\text{вл.в.}} - 1,0048 \cdot t_2) \cdot 1000}{2500 + 1,96 \cdot t_2}, \quad (3)$$

$$d_2 = \frac{(141,8 - 1,0048 \cdot 45) \cdot 1000}{2500 + 1,96 \cdot 45} = 37,3 \frac{\text{г}}{\text{кг с. в.}}$$

Вспользуемся формулой для вычисления относительной влажности φ_2 :

$$\varphi_2 = \frac{d_2 \cdot (0,622 + d_{\text{max}_2})}{d_{\text{max}_2} \cdot (622 + d_2)}. \quad (4)$$

Из таблиц для *насыщенного водяного пара* найдем значение $p_{\text{H}_2} = 9580$ Па (при $t_2 = 45$ °С) и определим значение влагоемкости d_{max_2} :

$$d_{\text{max}_2} = 622 \cdot \frac{p_{\text{H}_2}}{B - p_{\text{H}_2}}, \quad (5)$$

$$d_{\text{max}_2} = 622 \cdot \frac{9580}{745 \cdot 133,32 - 9580} = 66,4 \frac{\text{г}}{\text{кг с. в.}}$$

Значение $d_{\text{max}_2} = 66,4$ г/кг с.в. говорит о том, что при атмосферном давлении $B = 745$ мм рт.ст. и температуре $t_2 = 45$ °С в объеме влажного воздуха массой (1 кг + 66,4 г) может содержаться не более 66,4 г влаги. Иными словами, на 1 кг сухого воздуха приходится не более 66,4 г влаги. Подставим полученное значение d_{max_2} в формулу (4):

$$\varphi_2 = \frac{37,3 \cdot (0,622 + 66,4)}{66,4 \cdot (622 + 37,3)} = 0,59 = 59 \%$$

Ответ: $d_2 = 37,3$ г/кг с.в.; $\varphi_2 = 59$ % .

Литература

1. Амерханов Р.А., Драганов Б.Х. Теплотехника: учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М., 2006. 432 с.: ил.
2. Купреенко А.И., Исаев Х.М., Михайличенко С.М. Гидрогазодинамика. Примеры решения задач: методические указания по выполнению практических и самостоятельных работ по дисциплине «Гидрогазодинамика». Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2020. 48 с.
3. Купреенко А.И., Исаев Х.М., Михайличенко С.М. Теплотехника. Примеры решения задач: методические указания по выполнению практических и самостоятельных работ по дисциплине «Теплотехника» Ч. I. Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2021. 57 с.
4. Рабинович О.М. Сборник задач по технической термодинамике. М.: «Машиностроение», 1969. 376 с.
5. Рудобашта С.П. Теплотехника. М.: КолосС, 2010. 599 с.: ил. (Учебники и учеб. пособия для студентов высш. учеб. заведений).
6. Чащинов В.И. Практикум по теплотехнике: учебное пособие для студентов агроинженерных специальностей. Брянск: Изд. БГСХА, 2009. 86 с.
7. Чащинов В.И. Теплотехника: учебное пособие для студентов, обучающихся по направлениям подготовки для предприятий переработки сельскохозяйственной продукции, пищевых производств и предприятий общественного питания. Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2015. 220 с.

П Р И Л О Ж Е Н И Я

Приложение 1 – Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по температуре)

t_s	P_s	v'	v''	h'	h''	r	s'	s''
°С	бар	м ³ /кг	м ³ /кг	кДж/кг	кДж/кг	кДж/кг	кДж/(кг·К)	кДж/(кг·К)
0	0,006108	0,0010002	206,32	-0,04	2501,0	2501,0	-0,0002	9,1565
0,01	0,006112	0,0010002	206,20	0,000614	2501,0	2501,0	0,0000	9,1560
1	0,006566	0,0010002	192,61	4,17	2502,8	2498,6	0,0152	9,1298
2	0,007054	0,0010001	179,94	8,39	2504,7	2496,3	0,0306	9,1035
3	0,007575	0,0010001	168,17	12,60	2506,5	2493,9	0,0459	9,0773
4	0,008129	0,0010000	157,27	16,80	2508,3	2491,5	0,0611	9,0514
5	0,008718	0,0010000	147,17	21,01	2510,2	2489,2	0,0762	9,0258
6	0,009346	0,0010000	137,768	25,21	2512,0	2486,8	0,0913	9,0003
7	0,010012	0,0010001	129,061	29,41	2513,9	2484,5	0,1063	8,9751
8	0,010721	0,0010001	120,952	33,60	2515,7	2482,1	0,1213	8,9501
9	0,011473	0,0010002	113,423	37,80	2517,5	2479,7	0,1362	8,9254
10	0,012271	0,0010003	106,419	41,99	2519,4	2477,4	0,1510	8,9009
11	0,013118	0,0010003	99,896	46,19	2521,2	2475,0	0,1658	8,8766
12	0,014015	0,0010004	93,828	50,38	2523,0	2472,6	0,1805	8,8525
13	0,014967	0,0010006	88,165	54,57	2524,9	2470,2	0,1952	8,8286
14	0,015974	0,0010007	82,893	58,75	2526,7	2467,9	0,2098	8,8050
15	0,017041	0,0010008	77,970	62,94	2528,6	2465,7	0,2243	8,7815
16	0,018170	0,0010010	73,376	67,13	2530,4	2463,3	0,2388	8,7583
17	0,019364	0,0010012	69,087	71,31	2532,2	2460,9	0,2533	8,7353

t_s	P_s	v'	v''	h'	h''	r	s'	s''
18	0,020626	0,0010013	65,080	75,50	2534,0	2458,5	0,2677	8,7125
19	0,021960	0,0010015	61,334	79,68	2535,9	2456,2	0,2820	8,6898
20	0,023368	0,0010017	57,833	83,86	2537,7	2453,8	0,2963	8,6674
21	0,024855	0,0010019	54,556	88,04	2539,5	2451,5	0,3105	8,6452
22	0,026424	0,0010022	51,488	92,22	2541,4	2449,2	0,3247	8,6232
23	0,028079	0,0010024	48,615	96,41	2543,2	2446,8	0,3389	8,6014
24	0,029824	0,0010026	45,923	100,59	2545,0	2444,4	0,3530	8,5797
25	0,031663	0,0010030	43,399	104,77	2546,8	2442,0	0,3670	8,5583
26	0,033600	0,0010032	41,031	108,95	2548,6	2439,6	0,3810	8,5370
27	0,035639	0,0010034	38,811	113,13	2550,4	2437,3	0,3949	8,5159
28	0,037785	0,0010037	36,726	117,31	2552,3	2435,0	0,4088	8,4950
29	0,040043	0,0010040	34,768	121,48	2554,1	2432,6	0,4227	8,4743
30	0,042417	0,0010043	32,929	125,66	2555,9	2430,2	0,4365	8,4537
31	0,044913	0,0010046	31,199	129,84	2557,7	2427,9	0,4503	8,4334
32	0,047536	0,0010049	29,572	134,02	2559,5	2425,5	0,4640	8,4132
33	0,050290	0,0010053	28,042	138,20	2561,4	2423,2	0,4777	8,3932
34	0,053182	0,0010056	26,602	142,38	2563,2	2420,8	0,4913	8,3733
35	0,056217	0,001060	25,246	146,56	2565,0	2418,4	0,5049	8,3536
36	0,059401	0,0010063	23,968	150,74	2566,8	2416,1	0,5184	8,3341
37	0,062740	0,0010067	22,764	154,92	2568,6	2413,7	0,5319	8,3147
38	0,066240	0,0010070	21,629	159,09	2570,4	2411,3	0,5453	8,2955
39	0,069907	0,0010074	20,558	163,27	2572,2	2408,9	0,5588	8,2765
40	0,073749	0,0010078	19,548	167,45	2404,2	2406,5	0,5721	8,2389

ts	P_s	v'	v''	h'	h''	r	s'	s''
45	0,095817	0,0010099	15,278	188,35	2394,5	2394,5	0,6383	8,1655
50	0,123350	0,0010121	12,048	209,26	2382,5	2382,5	0,7035	8,0771
55	0,157400	0,0010145	9,5812	230,17	2600,7	2370,5	0,7677	7,9922
60	0,199190	0,00101712	7,6807	251,09	2609,5	2358,4	0,8310	7,9106
64	0,239100	0,0010193	6,4711	267,84	2616,4	2348,6	0,8809	7,8475
65	0,250080	0,0010199	6,2042	272,02	2618,2	2346,2	0,8933	7,8320
70	0,311610	0,0010228	5,0479	292,97	2626,8	2333,8	0,9548	7,7565
75	0,36963	0,0010253	4,3015	309,74	2633,6	2323,9	1,0034	7,6980
80	0,47359	0,0010292	3,4104	334,92	2643,8	2308,9	1,0752	7,6135
85	0,57803	0,0010326	2,8300	355,92	2652,1	2296,2	1,1343	7,5459
90	0,70108	0,0010361	2,3624	376,94	2660,3	2283,4	1,1925	7,7805
95	0,84525	0,0010398	1,9832	397,99	2668,4	2270,4	1,2500	7,4174
100	1,01325	0,0010434	1,6738	419,06	2676,3	2257,2	1,3069	7,73564
105	1,2080	0,0010477	1,4200	440,17	2684,1	2243,9	1,3630	7,2974
110	1,4326	0,0010519	1,2106	461,32	2691,8	2230,5	1,4185	7,2402
115	1,6905	0,0010562	1,0369	482,50	2699,3	2216,8	1,4733	7,1848
120	1,9854	0,0010606	0,8920	503,7	2706,6	2209,9	1,5276	7,1310
125	2,3209	0,0010652	0,77067	525,0	2713,8	2188,8	1,5813	7,0788
130	2,7012	0,0010700	0,66851	546,3	2720,7	2174,4	1,6344	7,0281
135	3,1306	0,0010750	0,58212	567,7	2727,4	2159,7	1,6869	6,9787
140	3,6136	0,0010801	0,50875	589,1	2734,0	2144,9	1,7390	6,9307
145	4,1550	0,0010853	0,44618	610,6	2740,3	2129,7	1,7906	6,8838
150	4,7597	0,0010908	0,39261	632,2	2746,3	2114,1	1,8416	6,8381

ts	P_s	v'	v''	h'	h''	r	s'	s''
155	5,4331	0,0010964	0,34656	653,8	2752,1	2098,3	1,8923	6,7934
160	6,1800	0,0011022	0,30685	675,5	2757,7	2082,2	1,9425	6,7498
165	7,0075	0,0011082	0,27246	697,3	2763,0	2065,7	1,9922	6,7070
170	7,9202	0,0011145	0,24259	719,1	2768,0	2048,9	2,0416	6,6652
175	8,9246	0,0011209	0,21656	741,1	2772,7	2031,6	2,0906	6,6241
180	10,027	0,0011275	0,19381	763,1	2777,1	2014,0	2,1393	6,5838
185	11,234	0,0011344	0,17385	785,3	2781,2	1995,9	2,1876	6,5441
190	12,552	0,00114	0,15631	807,5	2784,9	1977,4	2,2356	6,5052
195	13,989	0,0011489	0,14082	829,9	2788,3	1958,4	2,2833	6,4667
200	15,551	0,0011565	0,12714	852,4	2791,4	1939,0	2,3307	6,4289
205	17,245	0,0011644	0,11500	875,0	2794,1	1919,1	2,3778	6,3915
210	19,079	0,0011726	0,10422	897,8	2796,4	1898,6	2,4247	6,3546
215	21,063	0,0011811	0,09460	920,6	2798,4	1877,8	2,4714	6,3181
220	23,201	0,0011900	0,08602	943,7	2799,9	1856,2	2,5178	6,2819
225	25,504	0,0011992	0,07833	966,9	2801,0	1834,1	2,5641	6,2460
230	27,979	0,0012087	0,07143	990,3	2801,7	1811,4	2,6102	6,2104
235	30,635	0,0012186	0,06523	1013,9	2801,9	1788,0	2,6562	6,1749
240	33,480	0,0012291	0,05964	1037,6	2801,6	1764,0	2,7021	6,1397
245	36,524	0,0012399	0,05459	1061,6	2800,8	1739,2	2,7479	6,1045
250	39,776	0,0012513	0,05002	1085,8	2799,5	1713,7	2,7936	6,0693
255	43,245	0,0012632	0,04588	1110,3	2797,7	1687,4	2,8393	6,0341
260	46,940	0,0012756	0,04212	1135,0	2795,2	1660,2	2,8850	5,9989
265	50,872	0,0012887	0,03870	1160,0	2792,1	1632,1	2,9308	5,9635

ts	P_s	v'	v''	h'	h''	r	s'	s''
270	55,051	0,0013025	0,03557	1185,4	2788,3	1602,9	2,9766	5,9278
275	59,487	0,0013170	0,03272	1211,0	2783,8	1572,8	3,0226	5,8918
280	64,191	0,0013324	0,03010	1237,0	2778,6	1541,6	3,0687	5,8555
285	69,174	0,0013487	0,02771	1263,4	2772,4	1509,0	3,1150	5,8186
290	74,448	0,0013659	0,02551	1290,3	2765,4	1475,1	3,1616	5,7811
295	80,025	0,0013844	0,02348	1317,6	2757,5	1439,9	3,2085	5,7428
300	85,917	0,0014041	0,02162	1345,4	2748,4	1403,0	3,2559	5,7037
305	92,136	0,0014252	0,01989	1373,9	2738,3	1364,4	3,3037	5,6637
310	9,8697	0,0014480	0,01829	1402,9	2726,8	1323,9	3,3522	5,6224
315	105,61	0,0014726	0,01681	1432,7	2714,0	1281,3	3,4013	5,5798
320	112,90	0,0014995	0,01544	1463,4	2699,6	1236,2	3,4513	5,5356
325	120,57	0,0015289	0,01416	1494,9	2683,6	1188,7	3,5023	5,4896
335	137,14	0,0015977	0,01184	1561,4	2645,4	1084,0	3,6084	5,3908
340	146,08	0,0016390	0,01078	1596,8	2622,3	1025,5	3,6638	5,3363
345	155,48	0,0016859	0,009779	1633,7	2596,2	962,5	3,7211	5,2782
350	165,37	0,0017407	0,00882	1672,9	2566,1	893,2	3,7816	5,2149
355	175,77	0,0018073	0,007895	1715,5	2530,5	815,0	3,8467	5,1442
360	186,74	0,0018930	0,006970	1763,1	2485,7	722,6	3,9189	5,0603
365	198,30	0,002015	0,006013	1819,5	2424,2	604,7	4,0041	4,9517
370	210,53	0,002231	0,004958	1896,2	2335,7	439,5	4,1198	4,8031
374,12	221,15	0,003147	0,003147	2095,2	2095,2	0	4,4237	4,4237

Приложение 2 – Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по давлению)

P_s	t_s	v'	v''	h'	h''	r	s'	s''
бар	°C	м ³ /кг	м ³ /кг	кДж/кг	кДж/кг	кДж/кг	кДж/(кг·К)	кДж/(кг·К)
0,010	13,034	0,0010006	87,982	54,71	2525,0	2470,3	0,1956	8,8278
0,015	17,511	0,0010012	67,006	73,45	2533,2	2459,8	0,2606	8,7236
0,020	19,029	0,0010015	61,229	79,80	2535,9	2456,1	0,2824	8,6892
0,025	21,735	0,0010021	52,282	91,12	2540,9	2449,8	0,3210	8,6290
0,030	25,178	0,0010029	42,967	105,51	2547,2	2441,7	0,3695	8,5545
0,035	27,172	0,0010035	38,443	113,84	2550,8	2437,0	0,3973	8,5123
0,040	29,828	0,0010043	33,237	124,94	2555,6	2430,7	0,4341	8,4573
0,045	31,420	0,0010048	30,503	131,60	2558,5	2426,9	0,4560	8,4249
0,050	33,60	0,0010055	27,172	140,70	2562,4	2421,7	0,4858	8,3813
0,055	34,93	0,0010059	25,338	146,27	2564,8	2418,5	0,5039	8,3550
0,060	36,78	0,0010066	23,020	154,01	2568,2	2414,2	0,5290	8,3189
0,065	37,93	0,0010070	21,703	158,81	2570,3	2411,5	0,5444	8,2968
0,070	38,49	0,0010072	21,101	161,12	2571,3	2410,2	0,5519	8,2863
0,075	39,02	0,0010074	20,532	163,38	2572,2	2408,8	0,5591	8,2760
0,080	40,32	0,0010079	19,241	168,77	2574,5	2405,7	0,5763	8,2517
0,085	41,53	0,0010084	18,106	173,87	2576,7	2402,8	0,5926	8,2289
0,090	42,69	0,0010089	17,102	178,69	2578,8	2400,1	0,6079	8,2076
0,095	43,79	0,0010094	16,206	183,28	2580,8	2397,5	0,6224	8,1875
0,100	44,83	0,0010098	15,402	187,66	2582,6	2394,9	0,6361	8,1685

P_s	t_s	v'	v''	h'	h''	r	s'	s''
0,150	52,58	0,0010133	10,696	220,03	2596,4	2376,4	0,7367	8,0330
0,200	58,98	0,0010166	8,0288	246,83	2607,7	2360,9	0,8182	7,9269
0,250	64,08	0,0010194	6,4483	268,18	2616,6	2348,4	0,8820	7,8462
0,300	68,35	0,0010219	5,3998	286,05	2624,0	2337,9	0,9346	7,7811
0,400	75,89	0,0010265	3,9949	317,65	2636,8	2319,2	1,0261	7,6711
0,500	81,35	0,0010301	3,2415	340,57	2646,0	2305,4	1,0912	7,5951
0,550	83,74	0,0010317	2,9648	350,61	2650,0	2299,4	1,1194	7,5627
0,600	85,95	0,0010333	2,7329	359,93	2653,6	2293,7	1,1454	7,5332
0,650	88,02	0,0010347	2,5357	368,62	2657,0	2288,4	1,1696	7,5061
0,700	89,96	0,0010361	2,3658	376,77	2660,2	2283,4	1,1921	7,4811
0,750	91,78	0,0010375	2,2179	384,45	2663,2	2278,8	1,2132	7,4577
0,800	93,51	0,0010387	2,0879	391,72	2666,0	2274,3	1,2330	7,4360
0,850	95,14	0,0010400	1,9728	398,63	2668,6	2270,0	1,2518	7,4155
0,900	96,71	0,0010412	1,8701	405,21	2671,1	2265,9	1,2696	7,3963
0,950	98,20	0,0010423	1,7779	411,49	2673,5	2262,0	1,2865	7,3781
1,000	99,63	0,0010434	1,6946	417,51	2675,7	2258,2	1,3027	7,3608
1,50	111,37	0,0010530	1,1597	467,13	2693,9	2226,8	1,4336	7,2248
2,00	120,23	0,0010608	0,88592	504,7	2706,9	2202,2	1,5301	7,1286
2,50	127,43	0,0010675	0,71881	535,4	2717,2	2181,8	1,6072	7,0540
3,00	133,54	0,0010735	0,60586	561,4	2725,5	2164,1	1,6717	6,9930
3,50	138,88	0,0010789	0,52425	584,3	2632,5	2148,2	1,7273	6,6412
4,00	143,62	0,0010839	0,4624	604,7	2738,5	2133,8	1,7764	6,8966

p_s	t_s	v'	v''	h'	h''	r	s'	s''
4,50	147,92	0,0010885	0,4139	623,2	2743,8	2120,6	1,8204	6,8570
5,00	151,85	0,0010928	0,37481	640,1	2748,5	2108,4	1,8604	6,8215
5,50	155,47	0,0010969	0,34259	655,8	2752,7	2096,9	1,8970	6,7893
6,00	158,84	0,0011009	0,31566	670,4	2756,4	2086,0	1,9368	6,7598
6,50	161,99	0,0011046	0,29257	684,2	2759,9	2075,7	1,9623	6,7326
7,00	164,96	0,0011082	0,27274	697,1	2762,9	2065,8	1,9918	6,7074
7,50	167,76	0,0011117	0,25548	709,3	2765,8	2056,5	2,0195	6,6838
8,00	170,42	0,0011150	0,24030	720,9	2768,4	2047,5	2,0457	6,6618
8,50	172,95	0,0011182	0,22685	732,0	2770,8	2038,8	2,0705	6,6409
9,00	175,36	0,0011213	0,2148	742,6	2773,0	2030,4	2,0941	6,6212
9,50	177,67	0,0011244	0,20405	752,8	2775,1	2022,3	2,1166	6,6025
10,00	179,88	0,0011274	0,19430	762,6	2777,0	2014,4	2,1382	6,5847
10,50	182,01	0,0011303	0,18546	772,0	2778,7	2006,7	2,1588	6,5677
11,00	184,06	0,0011331	0,17739	781,1	2780,4	1999,3	2,1786	6,5515
11,50	186,04	0,0011359	0,17000	789,9	2782,0	1992,1	2,1976	6,5359
12,00	187,96	0,0011386	0,1632	798,4	2783,4	1985,0	2,2160	6,5210
12,50	189,81	0,0011412	0,15693	806,7	2784,8	1978,1	2,2338	6,5066
13,00	191,60	0,0011438	0,15112	814,7	2786,0	1971,3	2,2509	6,4927
13,50	193,35	0,0011464	0,14574	822,5	2787,3	1964,8	2,2675	6,4794
14,00	195,04	0,0011489	0,1407	830,1	2788,4	1958,3	2,2836	6,4665
14,50	196,68	0,0011514	0,13603	837,5	2789,4	1951,9	2,2992	6,4539
15,00	198,28	0,0011538	0,13165	844,7	2790,4	1945,7	2,3144	6,4418

15,50	199,84	0,0011562	0,12754	851,7	2791,3	1939,6	2,3292	6,4300
16,00	201,37	0,0011586	0,12368	858,6	2792,2	1933,6	2,3436	6,4187
16,50	202,85	0,0011610	0,12004	865,3	2793,0	1927,7	2,3576	6,4075
17,00	204,30	0,0011633	0,11661	871,8	2793,8	1922,0	2,3712	6,3967
P_s	t_s	v'	v''	h'	h''	r	s'	s''
17,50	205,72	0,0011656	0,11338	878,3	2794,5	1916,2	2,3846	6,3862
18,00	207,10	0,0011678	0,11031	884,6	2795,1	1910,5	2,3976	6,3759
19,00	209,79	0,0011722	0,10464	896,8	2796,4	1899,6	2,4227	6,3561
19,50	211,09	0,0011744	0,10202	902,7	2796,9	1894,2	2,4349	6,3466
20,00	212,37	0,0011766	0,09953	908,6	2797,4	1888,8	2,4468	6,3373
20,50	213,62	0,0011787	0,09715	914,3	2797,9	1883,6	2,4585	6,3281
21,00	214,85	0,0011808	0,09488	919,9	2798,3	1878,4	2,4699	6,3192
21,50	216,05	0,0011830	0,09271	925,5	2798,7	1873,2	2,4812	6,3104
22,00	217,24	0,0011850	0,09064	930,9	2799,1	1868,2	2,4922	6,3018
22,50	218,40	0,0011871	0,08866	936,3	2799,5	1863,2	2,5030	6,2934
23,00	219,54	0,0011891	0,08676	941,6	2799,8	1858,2	2,5136	6,2851
23,50	220,67	0,0011912	0,08494	946,8	2800,1	1853,3	2,5240	6,2771
24,00	221,78	0,0011932	0,08319	951,9	2800,4	1848,5	2,5343	6,2691
24,50	222,86	0,0011952	0,08151	957,0	2800,6	1843,6	2,5444	6,2613
25,00	223,94	0,0011972	0,07990	962,0	2800,8	1838,8	2,5543	6,2536
25,50	224,99	0,0011991	0,07834	966,9	2801,0	1834,1	2,5640	6,2460
26,00	226,03	0,0012011	0,07685	971,7	2801,2	1829,5	2,5736	6,2386
26,,50	227,06	0,0012030	0,07541	976,5	2801,4	1824,9	2,5831	6,2313

P_s	t_s	v'	v''	h'	h''	r	s'	s''
27,00	228,06	0,0012050	0,07402	981,2	2801,5	1820,3	2,5924	6,2241
27,50	229,06	0,0012069	0,07268	985,9	2801,6	1815,7	2,6016	6,2170
28,00	230,04	0,0012088	0,07138	990,5	2801,7	1811,2	2,6106	6,2101
28,50	231,01	0,0012107	0,07013	995,0	2801,8	1806,8	2,6195	6,2032
29,00	231,96	0,0012126	0,06892	999,5	2801,8	1802,3	2,6283	6,1964
29,50	232,91	0,0012145	0,06775	1004,0	2801,9	1797,9	2,6370	6,1898
30,00	233,84	0,0012163	0,06662	1008,4	2801,9	1793,5	2,6455	6,1832
31,00	235,66	0,0012200	0,06446	1017,0	2801,9	1784,9	2,6623	6,1703
35,00	242,54	0,0012342	0,05702	1049,8	2801,3	1751,5	2,7253	6,1218
40,00	250,33	0,0012521	0,04974	1087,5	2799,4	1711,9	2,7967	6,0670
45,00	257,41	0,0012691	0,04402	1122,2	2796,5	1674,3	2,8614	6,0171
50,00	263,92	0,0012858	0,03941	1154,6	2792,8	1638,2	2,9209	5,9712
60,00	275,56	0,0013187	0,03241	1213,9	2783,3	1569,4	3,0277	5,8878
70,,00	285,80	0,0013514	0,02734	1267,7	2771,4	1503,7	3,1225	5,8126
80,00	294,98	0,0013843	0,02349	1317,5	2757,5	1440,0	3,2083	5,7430
90,00	303,31	0,0014179	0,02046	1364,2	2741,8	1377,6	3,2875	5,6773
97,00	308,73	0,0014420	0,01869	1395,5	2729,8	1334,3	3,3398	5,6330
98,00	309,48	0,0014455	0,01845	1399,9	2728,0	1328,1	3,3471	5,6267
99,00	310,22	0,0014490	0,01822	1404,3	2726,2	1321,9	3,3544	5,6205
100,00	310,96	0,0014526	0,01800	1408,6	2724,4	1315,8	3,3616	5,6143
102,00	312,42	0,0014597	0,01756	1417,3	2720,8	1303,5	3,3759	5,6019
104,00	313,86	0,0014668	0,01714	1425,8	2717,1	1291,3	3,3900	5,5897

P_s	t_s	v'	v''	h'	h''	r	s'	s''
105,00	314,57	0,0014704	0,01694	1430,1	2715,2	1285,1	3,3970	5,5835
106,00	315,27	0,0014740	0,01674	1434,4	2713,2	1278,8	3,4040	5,5774
108,00	316,67	0,0014813	0,01635	1442,8	2709,4	1266,6	3,4179	5,5653
110,00	318,04	0,0014887	0,01597	1451,2	2705,4	1254,2	3,4316	5,5531
112,00	319,40	0,0014961	0,01560	1459,6	2701,5	1241,9	3,4452	5,5411
114,00	320,73	0,0015036	0,01525	1467,9	2697,3	1229,4	3,4587	5,5289
115,00	321,39	0,0015074	0,01507	1472,1	2695,3	1223,2	3,4654	5,5229
116,00	322,05	0,0015112	0,01490	1476,2	2693,2	1217,0	3,4721	5,5169
118,00	323,35	0,0015189	0,01457	1484,4	2689,0	1204,6	3,4854	5,5049
120,00	324,64	0,0015267	0,01425	1492,6	2684,4	1192,2	3,4986	5,4930
122,00	325,90	0,0015345	0,01394	1500,7	2680,4	1179,7	3,5117	5,4810
124,00	327,15	0,0015425	0,01363	1508,8	2676,0	1167,2	3,5247	5,4690
126,00	328,39	0,0015506	0,01334	1516,9	2671,6	1154,7	3,5376	5,4572
128,00	329,61	0,0015588	0,01305	1524,9	2667,0	1142,1	3,5505	5,4453
130,00	330,81	0,0015670	0,01277	1533,0	2662,4	1129,4	3,5633	5,4333
132,00	332,00	0,0015755	0,01250	1541,0	2657,7	1116,7	3,5760	5,4214
134,00	333,18	0,0015840	0,01224	1548,9	2653,0	1104,1	3,5886	5,4095
136,00	334,34	0,0015927	0,01199	1556,9	2648,2	1091,3	3,6012	5,3975
138,00	335,49	0,0016015	0,01174	1564,8	2643,3	1078,5	3,6137	5,3856
140,00	336,63	0,0016104	0,01149	1572,8	2638,3	1065,5	3,6262	5,3737
142,00	337,75	0,0016195	0,01126	1580,7	2633,2	1052,5	3,6387	5,3616
144,00	338,86	0,0016288	0,01102	1588,6	2628,1	1039,5	3,6511	5,3495

P_s	t_s	v'	v''	h'	h''	r	s'	s''
146,00	339,96	0,0016382	0,01080	1596,5	2622,9	1026,4	3,6635	5,3375
148,00	341,04	0,0016483	0,01057	1604,3	2617,1	1012,8	3,6755	5,3245
150,00	342,12	0,0016580	0,01035	1612,2	2611,6	999,4	3,6877	5,3122
152,00	343,18	0,0016680	0,01014	1620,0	2606,1	986,1	3,6999	5,2999
154,00	344,23	0,0016782	0,009930	1627,9	2600,4	972,5	3,7121	5,2874
156,00	345,27	0,0016886	0,009726	1635,7	2594,6	958,9	3,7242	5,2749
158,00	346,30	0,0016992	0,009526	1643,6	2588,7	945,1	3,7364	5,2623
160,00	347,32	0,0017101	0,009330	1651,5	2582,7	931,2	3,7486	5,2496
162,00	348,32	0,0017215	0,009138	1659,4	2576,6	917,2	3,7609	5,2368
164,00	349,32	0,0017327	0,008949	1667,4	2570,4	903,0	3,7731	5,2238
166,00	350,31	0,0017444	0,008763	1675,4	2564,0	888,6	3,7855	5,2108
168,00	351,29	0,0017565	0,008581	1683,5	2557,5	874,0	3,7978	5,1975
170,00	352,26	0,0017690	0,008401	1691,6	2550,8	859,2	3,8103	5,1841
180,00	356,96	0,0018380	0,007534	1733,4	2514,4	781,0	3,8739	5,1135
190,00	361,44	0,0019231	0,006700	1778,2	2470,1	691,9	3,9417	5,0321
200,00	365,71	0,002038	0,005873	1828,8	2413,8	585,0	4,0181	4,9338
210,00	369,79	0,002218	0,005006	1892,2	2340,2	448,0	4,1137	4,8106
220,00	373,68	0,002675	0,003757	2007,7	2192,5	184,8	4,2891	4,5748

Приложение 3 – Термодинамические свойства воды и перегретого пара

	p = 0,01бар			p = 0,02 бар			p = 0,03 бар			p = 0,04 бар		
<i>t</i>	<i>v</i>	<i>h</i>	<i>s</i>									
°C	м ³ /кг	кДж/кг	кДж/(кг·К)									
0	0,00102	0,0	-0,001	0,001	0,0	-0,0010	0,001	0,0	-0,0001	0,0010	0,0	-0,0001
10	130,60	2519,5	8,995	0,0010002	42,0	0,1510	0,0010002	42,0	0,1510	0,0010002	42,0	0,1510
20	135,23	2538,1	9,060	67,58	2537,8	8,7396	0,0010017	83,9	0,2963	0,0010017	83,9	0,2963
40	144,47	2575,5	9,1837	72,21	2575,3	8,8632	48,13	2575,0	8,6755	36,08	2574,8	8,5421
80	162,95	2650,6	9,4093	81,46	2650,4	9,0891	54,30	2650,3	8,9016	40,72	2650,2	8,7685
120	181,42	2726,2	9,6122	90,70	2726,1	9,2921	60,46	2726,0	9,1048	45,34	2726,0	8,9718
160	199,89	2802,6	9,7971	99,94	2802,5	9,4771	66,62	2802,4	9,2898	49,96	2802,4	9,1570
200	218,3	2879,7	9,9674	109,17	2879,7	9,6475	72,78	2879,6	9,4603	54,58	2879,6	9,3274
240	236,8	2957,7	10,1257	118,40	2957,7	9,8058	78,93	2957,7	9,6186	59,20	2957,6	9,4858
280	255,3	3036,7	10,2739	127,64	3036,7	9,9539	85,09	3036,6	9,7668	63,81	3036,6	9,6340
320	273,7	3116,6	10,4134	136,87	3116,6	10,0934	91,24	3116,6	9,9063	68,43	3116,6	9,7735
360	292,2	3197,5	10,5454	146,10	3197,5	10,2255	97,40	3197,5	10,0383	73,05	3197,5	9,9055
400	310,7	3279,5	10,6709	155,33	3279,5	10,351	103,55	3279,5	10,164	77,66	3279,5	10,001
440	329,1	3362,4	10,790	164,56	3362,4	10,470	109,70	3362,4	10,283	82,28	3362,4	10,150
480	347,6	3446,5	10,905	173,8	3446,5	10,585	115,86	3446,5	10,398	86,89	3446,5	10,265
520	366,0	3531,7	11,015	183,0	3531,7	10,695	122,01	3531,6	10,508	91,51	3531,6	10,375
560	384,50	3618,0	11,121	192,2	3617,9	10,802	128,17	3617,9	10,614	96,12	3617,9	10,482
600	402,96	3705,3	11,224	201,5	3705,3	10,904	134,32	3705,3	10,717	100,74	3705,3	10,584

	p = 0,05 бар			p = 0,06 бар			p = 0,07 бар			p = 0,08 бар		
<i>t</i>	<i>v</i>	<i>h</i>	<i>s</i>									
°C	м ³ /кг	кДж/кг	кДж/(кг·К)									
0	0,0010002	0,0	-0,0001	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	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	0,0010017	83,9	0,2963
30	0,0010043	126,7	0,4365	0,0010043	125,7	0,4365	0,0010043	125,7	0,4365	0,0010043	125,7	0,4365
40	28,86	2574,6	8,4385	24,04	2574,3	8,3537	20,60	2574,1	8,2819	0,0010078	167,4	0,5721
80	32,57	2650,0	8,6652	27,13	2649,9	8,5808	23,25	2649,7	8,5093	20,34	2649,6	8,4474
120	36,27	2725,9	8,8687	30,22	2725,8	8,7843	25,90	2725,7	8,7130	22,66	2725,6	8,6512
160	39,97	2802,3	9,0539	33,30	2802,3	8,9696	28,54	2802,2	8,8984	24,97	2802,1	8,8366
200	43,66	2879,5	9,2244	36,38	2879,5	9,1402	31,18	2879,5	9,0689	27,28	2879,4	9,0072
240	47,36	2957,6	9,3828	39,46	2957,6	9,2986	33,82	2957,5	9,2274	29,59	2957,5	9,1657
280	51,05	3036,6	9,5310	42,54	3036,6	9,4468	36,46	3036,5	9,3756	31,90	3036,5	9,3139
320	54,74	3116,5	9,6705	45,62	3116,5	9,5863	39,10	3116,5	9,5151	34,21	3116,5	9,4535
360	58,44	3197,5	9,8025	48,70	3197,4	9,7184	41,74	3197,4	9,6472	36,52	3197,4	9,5855
400	62,13	3279,4	9,9280	51,77	3279,4	9,8439	44,38	3279,4	9,7727	38,83	3279,4	9,7111
440	65,82	3362,4	10,048	54,85	3362,4	9,9637	47,01	3362,4	9,8925	41,14	3362,4	9,8309
480	69,51	3446,5	10,162	57,93	3446,5	10,078	49,65	3446,5	10,007	43,44	3446,5	9,9456
520	73,21	3531,7	10,273	61,00	3531,7	10,188	52,29	3531,6	10,117	45,75	3531,6	10,056
560	76,90	3617,9	10,379	64,08	3617,9	10,295	54,93	3617,9	10,223	48,06	3617,9	10,162
600	80,59	3705,3	10,481	67,16	3705,3	10,397	57,56	3705,3	10,326	50,37	3705,2	10,264

	p = 0,09 бар			p = 0,10 бар			p = 0,20 бар			p = 0,30 бар		
<i>t</i>	<i>v</i>	<i>h</i>	<i>s</i>									
°C	м ³ /кг	кДж/кг	кДж/(кг·К)									
0	0,0010002	0,0	-0,0001	0,0010002	0,0	-0,0001	0,0010002	0,0	-0,0001	0,0010002	0,0	-0,0001
20	0,0010017	83,9	0,2963	0,0010017	83,9	0,2963	0,0010017	83,9	0,2963	0,0010017	83,9	0,2963
40	0,0010078	167,4	0,5721	0,0010078	167,4	0,5721	0,0010078	167,5	0,5721	0,0010078	167,5	0,5721
50	16,53	2592,6	8,2243	14,87	2592,3	8,1752	0,0010121	209,3	0,7035	0,0010121	209,3	0,7035
60	17,05	2611,5	8,2821	15,34	2611,3	8,2331	0,0010171	251,1	0,8310	0,0010171	251,1	0,8310
80	18,08	2649,4	8,3927	16,27	2649,3	8,3437	8,119	2647,8	8,0205	5,402	2646,3	7,8301
120	20,14	2725,5	8,5967	18,12	2725,4	8,5479	9,052	2724,4	8,2261	6,027	2723,5	8,0371
160	22,20	2802,1	8,7822	19,98	2802,0	8,7334	9,980	2801,3	8,4124	6,649	2800,7	8,2241
200	24,25	2879,4	8,9528	21,82	2879,3	8,9041	10,907	2878,8	8,5834	7,268	2878,4	8,3956
240	26,30	2957,5	9,1113	23,67	2957,4	9,0626	11,832	2957,0	8,7422	7,885	2956,7	8,5545
280	28,36	3036,5	9,2595	25,52	3036,5	9,2109	12,757	3036,1	8,8906	8,502	3035,9	8,7031
320	30,41	3116,4	9,3991	27,37	3116,4	9,3504	13,681	3116,2	9,0302	9,119	3115,9	8,8428
360	32,46	3197,4	9,5312	29,22	3197,4	9,4825	14,605	3197,1	9,1624	9,735	3197,0	8,9750
400	34,51	3279,4	9,6567	31,06	3279,4	9,6081	15,529	3279,2	9,2880	10,351	3279,0	9,1007
440	36,57	3362,4	9,7765	32,91	3362,4	9,7279	16,45	3362,2	9,4078	10,967	3362,1	9,2205
480	38,62	3446,5	9,8912	34,76	3446,4	9,8426	17,38	3446,3	9,5225	11,583	3446,2	9,3353
520	40,67	3531,6	10,001	36,60	3531,6	9,9527	18,30	3531,5	9,6327	12,199	3531,4	9,4455
560	42,72	3617,9	10,107	38,45	3617,9	10,059	19,22	3617,8	9,7388	12,81	3617,7	9,5516
600	44,77	3705,2	10,210	40,29	3705,2	10,161	20,15	3705,1	9,8413	13,43	3705,1	9,6541

	p = 0,40 бар			p = 0,50 бар			p = 0,60 бар			p = 0,70 бар		
t	v	h	s	v	h	s	v	h	s	v	h	s
°C	м ³ /кг	кДж/кг	кДж/ (кг·К)									
0	0,0010002	0,0	-0,0001	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	0,0010002	42,1	0,1510
30	0,0010043	125,7	0,4365	0,0010043	125,7	0,4365	0,0010043	125,7	0,4365	0,0010043	125,7	0,4365
70	0,0010228	293,0	0,9548	0,0010228	293,0	0,9548	0,0010228	293,0	0,9548	0,0010228	293,0	0,9548
80	4,044	2644,9	7,6940	0,0010292	334,9	1,0752	0,0010292	334,9	1,0752	0,0010292	334,9	1,0752
90	4,162	2664,4	7,7485	3,324	2663,0	7,6425	2,765	2661,7	7,5554	2,366	2660,3	7,4813
120	4,515	2722,6	7,9025	3,608	2721,7	7,7977	3,003	2720,7	7,7116	2,571	27197	7,6386
160	4,983	2800,1	8,0903	3,983	2799,5	7,9862	3,317	2798,8	7,9009	2,841	2798,2	7,8286
200	5,448	2877,9	8,2621	4,356	2877,5	8,1584	3,628	2877,0	8,0735	3,108	2876,6	8,0017
240	5,912	2956,4	8,4213	4,728	2956,1	8,3178	3,938	2955,7	8,2332	3,374	2955,4	8,1615
280	6,375	3035,6	8,5700	5,099	3035,4	8,4667	4,248	3035,1	8,3822	3,640	3034,8	8,3106
320	6,838	3115,8	8,7098	5,469	3115,5	8,6066	4,557	3115,3	8,5222	3,905	3115,1	8,4508
360	7,300	3196,8	8,8421	5,839	3196,6	8,7389	4,865	3196,5	8,6545	4,170	3196,3	8,5832
400	7,763	3258,9	8,9678	6,209	3278,7	8,8646	5,174	3278,6	8,7803	4,434	3278,4	8,7090
440	8,225	3362,0	9,0877	6,579	3361,9	8,9845	5,482	3361,7	8,9003	4,698	3361,6	8,8290
480	8,687	3446,1	9,2024	6,949	3446,0	9,0993	5,790	3445,9	9,0151	4,962	3445,8	8,9438
520	9,149	3531,3	9,3127	7,318	3531,2	9,2096	6,098	3531,1	9,1254	5,227	3531,0	9,0541
560	9,610	3617,6	9,4188	7,688	3617,5	9,3157	6,406	3617,4	9,2315	5,491	3617,3	9,1603
600	10,07	3705,0	9,5212	8,057	3704,9	9,4182	6,714	3704,8	9,3340	5,755	3704,8	9,2628

	p = 0,80 бар			p = 0,90 бар			p = 1,00 бар			p = 2,00 бар		
<i>t</i>	<i>v</i>	<i>h</i>	<i>s</i>									
°C	м3/кг	кДж/кг	кДж/ (кг·К)									
0	0,0010002	0,0	-0,0001	0,0010002	0,0	-0,0001	0,0010002	0,0	-0,0001	0,0010001	0,2	-0,0001
10	0,0010002	42,1	0,1510	0,0010002	42,1	0,1510	0,0010002	42,1	0,1510	0,0010002	42,2	0,1510
30	0,0010043	125,7	0,4365	0,0010043	125,7	0,4365	0,0010043	125,8	0,4365	0,0010042	125,8	0,4364
40	0,0010078	167,5	0,5721	0,0010078	167,5	0,5721	0,0010078	167,5	0,5721	0,0010077	167,6	0,5720
90	0,0010361	376,9	1,1925	0,0010361	377,0	1,1925	0,0010361	377,0	1,1925	0,0010361	377,0	1,1924
110	2,187	2698,9	7,5239	1,942	2697,8	7,4673	1,745	2696,7	7,4164	0,0010518	461,4	1,4184
120	2,247	2718,8	7,5750	1,995	2717,8	7,5187	1,793	2716,8	7,4681	0,0010606	503,7	1,5276
160	2,484	2797,5	7,7658	2,206	2796,9	7,7103	1,984	2796,2	7,6605	0,9842	2789,5	7,3285
200	2,718	2876,1	7,9393	2,415	2875,6	7,8842	2,172	2875,2	7,8348	1,080	2870,4	7,5073
240	2,952	2955,0	8,0994	2,623	2954,7	8,0445	2,359	2954,3	7,9954	1,175	2950,8	7,6703
280	3,184	3034,6	8,2486	2,829	3034,3	8,1939	2,546	3034,0	8,1449	1,269	3031,2	7,8213
320	3,416	3114,9	8,3888	3,036	3114,7	8,3342	2,732	3114,4	8,2853	1,363	3112,2	7,9626
360	3,648	3196,1	8,5213	3,242	3195,9	8,4668	2,917	3195,7	8,4179	1,456	3193,8	8,0958
400	3,879	3278,3	8,6472	3,448	3278,1	8,5927	3,103	3278,0	8,5439	1,549	3276,4	8,2223
440	4,111	3361,5	8,7672	3,653	3361,3	8,7127	3,288	3361,2	8,6640	1,642	3359,8	8,3427
480	4,342	3445,7	8,8821	3,859	3445,6	8,8276	3,473	3445,4	8,7789	1,735	3444,3	8,4578
520	4,573	3530,9	8,9924	4,065	3530,8	8,9379	3,658	3530,7	8,8892	1,828	3529,7	8,5683
560	4,804	3617,3	9,0986	4,270	3617,2	9,0441	3,843	3617,1	8,9954	1,920	3616,2	8,6748
600	5,035	3704,7	9,2011	4,475	3704,6	9,1466	4,028	3704,5	9,0979	2,013	3703,7	8,7774

	p = 3,00 бар			p = 4,00 бар			p = 5,00 бар			p = 10 бар		
<i>t</i>	<i>v</i>	<i>h</i>	<i>s</i>									
°C	м ³ /кг	кДж/кг	кДж/(кг·К)									
0	0,0010001	0,3	-0,0001	0,0010000	0,4	0,0001	0,0010000	0,5	-0,0001	0,0009997	1,0	-0,0001
40	0,0010077	167,7	0,5720	0,0010076	167,8	0,5720	0,0010076	167,9	0,5719	0,0010074	168,3	0,5717
130	0,0010700	546,3	1,6343	0,0010699	546,4	1,6342	0,0010699	546,5	1,6341	0,0010696	546,8	1,6336
140	0,6170	2739,6	7,0274	0,0010800	589,1	1,7389	0,001080	589,2	1,7388	0,0010796	589,5	1,7383
150	0,6340	2761,2	7,0790	0,4708	2752,9	6,9308	0,001090	632,2	1,8416	0,0010904	632,5	1,8410
160	0,6508	2782,4	7,1287	0,4839	2775,0	6,9825	0,3836	2767,4	6,8653	0,0011019	675,7	1,9420
170	0,6674	2803,4	7,1767	0,4967	2796,8	7,0322	0,3942	2789,9	6,9169	0,0011143	719,2	2,0414
180	0,6838	2824,3	7,2232	0,5094	2818,3	7,0802	0,4046	2812,1	6,9664	0,1944	2777,3	6,5854
200	0,7164	2865,6	7,3123	0,5343	2860,6	7,1715	0,4249	2855,4	7,0603	0,2059	2827,5	6,6940
240	0,7805	2947,2	7,4780	0,5831	2943,5	7,3398	0,4646	2939,9	7,2314	0,2275	2920,5	6,8826
280	0,8438	3028,5	7,6305	0,6311	3025,7	7,4939	0,5034	3022,8	7,3871	0,2480	3008,3	7,0475
320	0,9067	3110,0	7,7727	0,6785	3107,7	7,6372	0,5416	3105,5	7,5314	0,2678	3094,0	7,1971
360	0,9692	3192,0	7,9065	0,7257	3190,1	7,7716	0,5796	3183,3	7,6664	0,2873	3178,9	7,3356
400	1,031	3274,9	8,0335	0,7726	3273,3	7,8990	0,6172	3271,8	7,7944	0,3066	3264,0	7,4606
440	1,094	3358,5	8,1542	0,8193	3357,2	8,0201	0,6548	3355,9	7,9157	0,3256	3349,3	7,5890
480	1,156	3443,1	8,2696	0,8660	3442,0	8,1357	0,6922	3440,8	8,0316	0,3446	3435,1	7,7061
520	1,218	3485,8	8,3255	0,8893	3484,7	8,1917	0,7109	3483,6	8,0877	0,3540	3478,3	7,7627
560	1,279	3615,3	8,4868	0,9590	3614,4	8,3533	0,7668	3613,5	8,2495	0,3823	3609,1	7,9256
600	1,341	3702,9	8,5896	1,0055	3702,2	8,4561	0,8040	3701,4	8,3525	0,4010	3697,4	8,0545

	p = 15 бар			p = 20 бар			p = 25 бар			p = 30 бар		
<i>t</i>	<i>v</i>	<i>h</i>	<i>s</i>									
°C	м ³ /кг	кДж/кг	кДж/(кг·К)									
0	0,0009995	1,5	0,0000	0,0009992	2,0	0,0000	0,0009990	2,5	0,00004	0,0009987	3,0	0,0001
40	0,0010071	168,8	0,5715	0,0010069	169,2	0,5713	0,0010067	169,7	0,5711	0,0010065	170,1	0,5709
120	0,0010599	504,6	1,5264	0,0010596	505,0	1,5260	0,0010593	505,3	1,5255	0,0010590	505,7	1,5250
190	0,001141	807,6	2,235	0,0011408	807,9	2,2345	0,0011403	808,1	2,2338	0,0011399	808,3	2,2330
210	0,1366	2822,9	6,5099	0,0011725	897,8	2,4245	0,0011719	898,0	2,4237	0,0011714	898,1	2,4228
220	0,1406	2849,2	6,5639	0,1021	2820,4	6,3842	0,0011897	943,7	2,5175	0,0011891	943,9	2,5166
230	0,1445	2874,7	6,6150	0,1053	2849,0	6,4416	0,08164	2820,4	6,2927	0,0012084	990,3	2,6098
240	0,1483	2899,3	6,6635	0,1084	2876,3	6,4953	0,08439	2851,0	6,3529	0,06818	2823,0	6,2245
280	0,1627	2993,0	6,8394	0,1200	2976,9	6,6842	0,09434	2959,8	6,5573	0,07714	2941,8	6,4477
320	0,1765	3082,1	6,9949	0,1308	3069,8	6,8466	0,10334	3057,1	6,7273	0,08500	3044,0	6,6262
360	0,1899	3169,3	7,1372	0,1411	3159,5	6,9929	0,1119	3149,6	6,8781	0,09232	3139,3	6,7818
400	0,2030	3256,1	7,2701	0,1512	3248,1	7,1285	0,1201	3239,9	7,0165	0,09933	3231,6	6,9231
440	0,2159	3342,6	7,3949	0,1610	3335,8	7,2550	0,1281	3328,9	7,1449	0,1061	3321,9	7,0535
480	0,2287	3429,3	7,5132	0,1708	3423,5	7,3747	0,1360	3417,5	7,2659	0,1128	3411,6	7,1758
500	0,2351	3472,9	7,5703	0,1756	3467,4	7,4323	0,1399	3461,9	7,3240	0,1161	3456,4	7,2345
510	0,2383	3494,7	7,5984	0,1780	3489,5	7,4606	0,1419	3484,1	7,3526	0,1178	3478,8	7,2633
520	0,2414	3516,6	7,6262	0,1804	3511,5	7,4886	0,1438	3506,4	7,3808	0,1194	3501,2	7,2918
560	0,2541	3604,6	7,7345	0,1900	3600,2	7,5977	0,1516	3595,7	7,4906	0,1259	3591,1	7,4024
600	0,2667	3693,5	7,8386	0,1995	3689,5	7,7024	0,1592	3685,5	7,5960	0,1324	3681,5	7,5084

	p = 35 бар			p = 40 бар			p = 45 бар			p = 50 бар		
<i>t</i>	<i>v</i>	<i>h</i>	<i>s</i>									
°C	м ³ /кг	кДж/кг	кДж/(кг·К)									
0	0,0009985	3,5	0,0001	0,0009982	4,0	0,0002	0,0009980	4,5	0,0002	0,0009977	5,1	0,0002
10	0,0009986	45,4	0,1507	0,0009984	45,9	0,1506	0,0009981	46,4	0,1506	0,0009979	46,9	0,1505
40	0,0010063	170,5	0,5708	0,0010060	171,0	0,5706	0,0010058	171,4	0,5704	0,0010056	171,9	0,5702
80	0,0010275	337,7	1,0730	0,0010273	338,1	1,0726	0,0010270	338,4	1,0723	0,0010268	338,8	1,0720"
120	0,0010587	506,0	1,5244	0,0010584	506,4	1,5242	0,0010582	506,7	1,5237	0,0010579	507,1	1,5232
160	0,0011001	677,2	1,9390	0,0010997	677,5	1,9385	0,0010993	677,8	1,9379	0,0010990	678,0	1,9373
200	0,0011545	853,2	2,3276	0,0011540	853,4	2,3268	0,0011534	853,6	2,3260	0,0011530	853,8	2,3253
240	0,0012288	1037,7	2,7018	0,0012280	1037,7	2,7007	0,0012272	1037,8	2,6996	0,0012264	1037,8	2,6985
250	0,05871	2828,1	6,1734	0,0012512	1085,8	2,7936	0,0012503	1085,8	2,7923	0,0012494	1085,8	2,7911
260	0,06085	2861,6	6,2369	0,5174	2835,6	6,1355	0,04454	2807,1	6,0370	0,0012750	1135,0	2,8842
270	0,06287	2892,9	6,2951	0,05366	2870,1	6,1995	0,04641	2845,3	6,1080	0,04053	2818,4	6,0184
320	0,07187	3030,3	6,5374	0,06200	3016,2	6,4573	0,05430	3001,5	6,3836	0,04811	2986,2	6,3147
360	0,07836	3128,9	6,6982	0,06787	3118,2	6,6237	0,05971	3107,2	6,5561	0,05316	3095,9	6,4939
400	0,08451	3223,1	6,8426	0,07339	3214,5	6,7713	0,06473	3205,8	6,7071	0,05780	3196,9	6,6486
440	0,09046	3314,8	6,9749	0,07869	3307,7	6,9058	0,06953	3300,5	6,8438	0,06220	3293,2	6,7875
460	0,09338	3360,3	7,0378	0,08128	3353,7	6,9694	0,07187	3347,1	6,9083	0,06434	3340,4	6,8528
520	0,10198	3496,0	7,2157	0,08890	3490,8	7,1491	0,07872	3485,5	7,0898	0,07058	3480,2	7,0361
560	0,1076	3586,6	7,3272	0,09387	3582,0	7,2614	0,08319	3577,4	7,2029	0,07464	3572,8	7,1501
600	0,1132	3677,5	7,4337	0,09879	3673,4	7,3686	0,08760	3669,4	7,3107	0,07864	3665,4	7,2586

	p = 60 бар			p = 70 бар			p = 80 бар			p = 90 бар		
<i>t</i>	<i>v</i>	<i>h</i>	<i>s</i>									
°C	м ³ /кг	кДж/кг	кДж/(кг·К)									
0	0,0009972	6,1	0,0003	0,0009967	7,1	0,0004	0,0009962	8,1	0,0004	0,0009958	9,1	0,0005
40	0,0010051	172,7	0,5698	0,0010047	173,6	0,5694	0,0010043	174,5	0,5690	0,0010038	175,4	0,5686
120	0,0010573	507,8	1,5224	0,0010567	508,5	1,5215	0,0010562	509,2	1,5206	0,0010556	509,9	1,5197
160	0,0010983	6-78,6	1,9361	0,0010976	679,2	1,9350	0,0010968	679,8	1,9338	0,0010961	680,4	1,9326
200	0,0011519	854,2	2,3237	0,0011510	854,6	2,3222	0,0011500	855,1	2,3207	0,0011490	855,5	2,3191
240	0,0012249	1037,9	2,6963	0,0012233	1038,0	2,6941	0,0012218	1038,2	2,6920	0,0012202	1038,3	2,6899
270	0,0013013	1185,2	2,9751	0,0012988	1184,9	2,9721	0,0012964	1184,6	2,9691	0,0012940	1184,3	2,9663
280	0,03317	2804,0	5,9253	0,0013307	1236,7	3,0667	0,0013277	1236,2	3,0633	0,0013249	1235,6	3,0600
290	0,03473	2846,5	6,0016	0,02801	2792,9	5,8509	0,0013639	1289,8	3,1594	0,0013604	1289,0	3,1555
300	0,03616	2885,0	6,0693	0,02946	2839,2	5,9322	0,02425	2785,4	5,7918	0,0014022	1344,9	3,2539
310	0,03750	2920,4	6,1306	0,03078	2880,2	6,0034	0,02560	2834,7	5,8771	0,02142	2781,8	5,746»
320	0,03876	2953,5	6,1869	0,03199	2917,8	6,0672	0,02682	2878,1	5,9510	0,02268	2833,5	5,8341
360	0,04331	3072,4	6,3811	0,03623	3047,6	6,2793	0,03089	3021,3	6,1849	0,02669	2993,2	6,0953
400	0,04738	3178,6	6,5438	0,03992	3159,7	6,4511	0,03431	3140,1	6,3670	0,02993	3119,7	6,2891
440	0,05119	3278,3	6,6876	0,04332	3263,0	6,6002	0,03741	3247,3	6,5218	0,03280	3231,2	6,4502
480	0,05484	3374,7	6,8191	0,04654	3361,9	6,7352	0,04031	3349,0	6,6605	0,03546	3335,7	6,5927
520	0,05837	3469,5	6,9417	0,04964	3458,6	6,8602	0,04309	3447,6	6,7881	0,03800	3436,4	6,7230
560	0,06182	3563,5	7,0575	0,05266	3554,1	6,9778	0,04578	3544,6	6,9075	0,04044	3535,0	6,8444
600	0,06521	3657,2	7,1673	0,05561	3649,0	7,0890	0,04841	3640,7	7,0201	0,04281	3632,4	6,9585

	p = 100 бар			p = 110 бар			p = 120 бар			p = 130 бар		
<i>t</i>	<i>v</i>	<i>h</i>	<i>s</i>									
°C	м ³ /кг	кДж/кг	кДж/(кг·К)									
0	0,0009953	10,1	0,0005	0,0009948	11,1	0,0006	0,0009943	12,1	0,0006	0,0009938	13,1	0,0006
40	0,0010034	176,3	0,5682	0,0010030	177,2	0,5678	0,0010026	178,1	0,5674	0,0010021	178,9	0,5670
100	0,0010386	426,5	1,2992	0,0010381	427,2	1,2984	0,0010376	428,0	1,2977	0,0010371	428,8	1,2969
140	0,0010739	595,4	1,7291	0,0010733	596,1	1,7281	0,0010727	596,7	1,7271	0,0010721	597,4	1,7261
200	0,0011480	855,9	2,3176	0,0011470	856,4	2,3161	0,0011461	856,8	2,315	0,0011451	857,2	2,313
240	0,0012188	1038	2,6878	0,0012173	1038,6	2,6857	0,0012158	1038,8	2,684	0,0012144	1038,9	2,682
290	0,0013570	1288	3,1517	0,0013536	1287,5	3,1480	0,0013504	1286,8	3,144	0,0013472	1286,1	3,141
310	0,0014472	1402,6	3,3513	0,0014416	1400,9	3,3459	0,0014362	1399,3	3,3407	0,0014310	1397,8	3,3356
320	0,01924	2782,0	5,7120	0,01625	2720,3	5,5782	0,0014941	1461,5	3,4464	0,0014869	1459,2	3,4400
330	0,02042	2835,4	5,8014	0,01754	2785,9	5,6880	0,01501	2727,6	5,5643	0,0015600	1526,9	3,5532
340	0,02147	2882,1	5,8782	0,01864	2840,4	5,7776	0,01620	2793,4	5,6725	0,01402	2738,8	5,5589
390	0,02568	3067,1	6,1689	0,02281	3043,2	6,0963	0,02040	3018,1	6,0259	0,01834	2991,7	5,9569
440	0,02910	3214,8	6,3837	0,02607	3197,8	6,3214	0,02354	3180,4	6,2622	0,02139	3162,6	6,2057
460	0,03036	3269,3	6,4591	0,02726	3254,1	6,3992	0,02467	3238,6	6,3427	0,02247	3222,8	6,2890
520	0,03392	3425,1	6,6635	0,03058	3413,7	6,6085	0,02780	3402,1	6,5571	0,02544	3390,3	6,5088
560	0,03616	3525,4	6,7869	0,03266	3515,6	6,7340	0,02974	3505,7	6,6847	0,02727	3495,8	6,6386
600	0,0383	3624,0	6,9025	0,0347	3615,5	6,8511	0,0316	3607,0	6,8034	0,0290	3598,4	6,7590

	p = 140 бар			p = 150 бар			p = 160 бар			p = 170 бар		
t	v	h	s	v	h	s	v	h	s	v	h	s
°C	м ³ /кг	кДж/кг	кДж/ (кг·К)									
0	0,0009933	14,1	0,0007	0,0009928	15,1	0,0007	0,0009924	16,1	0,0008	0,0009919	17,1	0,0008
20	0,0009955	97,0	0,2933	0,0009950	97,9	0,2930	0,0009946	98,8	0,2928	0,0009942	99,7	0,2926
40	0,0010017	179,8	0,5666	0,0010013	180,7	0,5662	0,0010008	181,6	0,5659	0,0010004	182,4	0,5655
80	0,0010226	346,0	1,0661	0,001021	346,8	1,0655	0,0010217	347,6	1,0648	0,0010212	348,4	1,0642
120	0,0010529	513,5	1,5153	0,0010523	514,2	1,5144	0,0010518	514,9	1,5136	0,0010512	515,6	1,5127
200	0,0011442	857,7	2,3117	0,0011432	858,1	2,3102	0,0011423	858,6	2,3087	0,0011414	859,0	2,3073
240	0,0012129	1039,1	2,6796	0,0012115	1039,3	2,6776	0,0012101	1039,5	2,6756	0,0012088	1039,7	2,6736
280	0,0013115	1233,5	3,0441	0,0013090	1233,1	3,0411	0,0013065	1232,8	3,0381	0,0013041	1232,4	3,0352
320	0,0014801	1457,0	3,4338	0,0014736	1455,0	3,4279	0,0014674	1453,0	3,4222	0,0014615	1451,2	3,4166
330	0,0015497	1523,5	3,5449	0,0015402	1520,3	3,5371	0,0015312	1517,3	3,5296	0,0015229	1514,6	3,5225
340	0,01201	2672,6	5,4297	0,0016323	1594,6	3,6592	0,0016175	1589,6	3,6484	0,0016042	1585,9	3,6384
350	0,01323	2753,5	5,5606	0,01148	2693,8	5,4450	0,009782	2618,5	5,3071	0,001728	1668,7	3,7736
360	0,01422	2817,4	5,6624	0,01258	2771,3	5,5685	0,01107	2717,8	5,4653	0,009616	2653,6	5,3475
400	0,01722	3004,0	5,9488	0,01566	2977,6	5,8851	0,01427	2949,7	5,8215	0,01303	2920,2	5,7575
440	0,01954	3144,2	6,1512	0,01794	3125,2	6,0984	0,01652	3105,8	6,0470	0,01527	3085,7	5,9966
480	0,02157	3265,9	6,3174	0,01989	3251,2	6,2704	0,01842	3236,2	6,2250	0,01712	3220,8	6,1811
520	0,02342	3378,4	6,4630	0,02166	3366,4	6,4194	0,02013	3354,2	6,3777	0,01877	3341,8	6,3376
560	0,02515	3485,8	6,5951	0,02332	3475,6	6,5539	0,02171	3465,4	6,5146	0,02029	3455,1	6,4770
600	0,02681	3589,8	6,7172	0,02489	3581,2	6,6776	0,02321	3572,4	6,6401	0,02173	3563,6	6,6043

Учебное издание

Михайличенко С.М.,

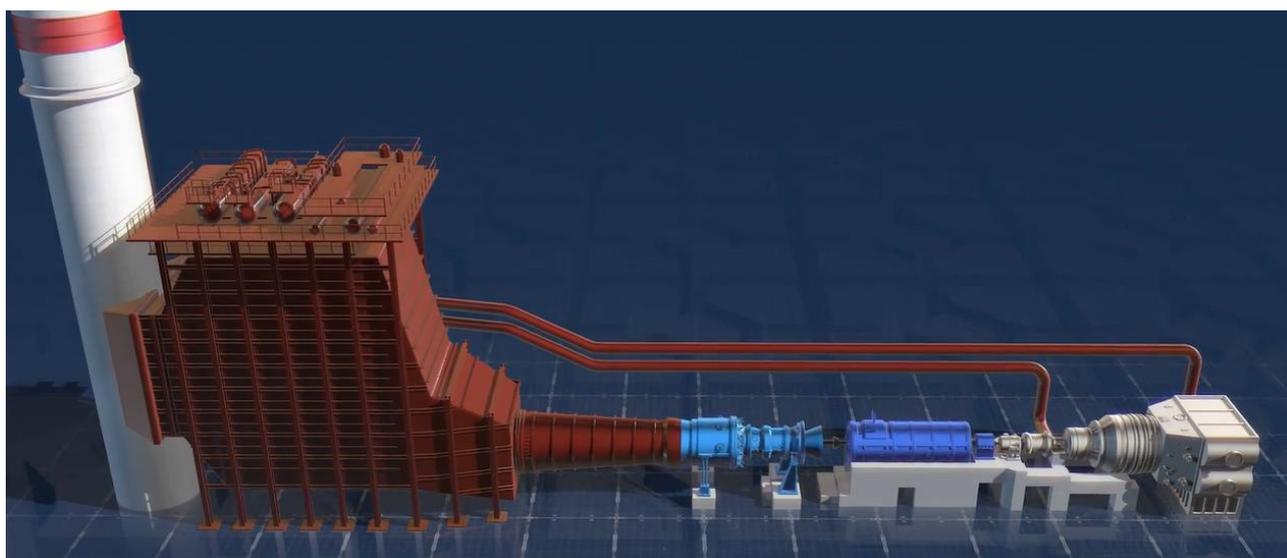
Купреенко А.И.,

Исаев Х.М.

ТЕПЛОТЕХНИКА

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Методическое пособие по выполнению практических и самостоятельных работ



Редактор Адылина Е.С.

Подписано к печати 19.05. 2022 г. Формат 60x84. 1/16.

Бумага печатная Усл.п.л. 7.67. Тираж 25 экз. Изд. №7277

Издательство Брянского государственного аграрного университета
243365 Брянская обл., Выгоничский район, с. Кокино, Брянский ГАУ