

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ**  
**УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**  
**«БРЯНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

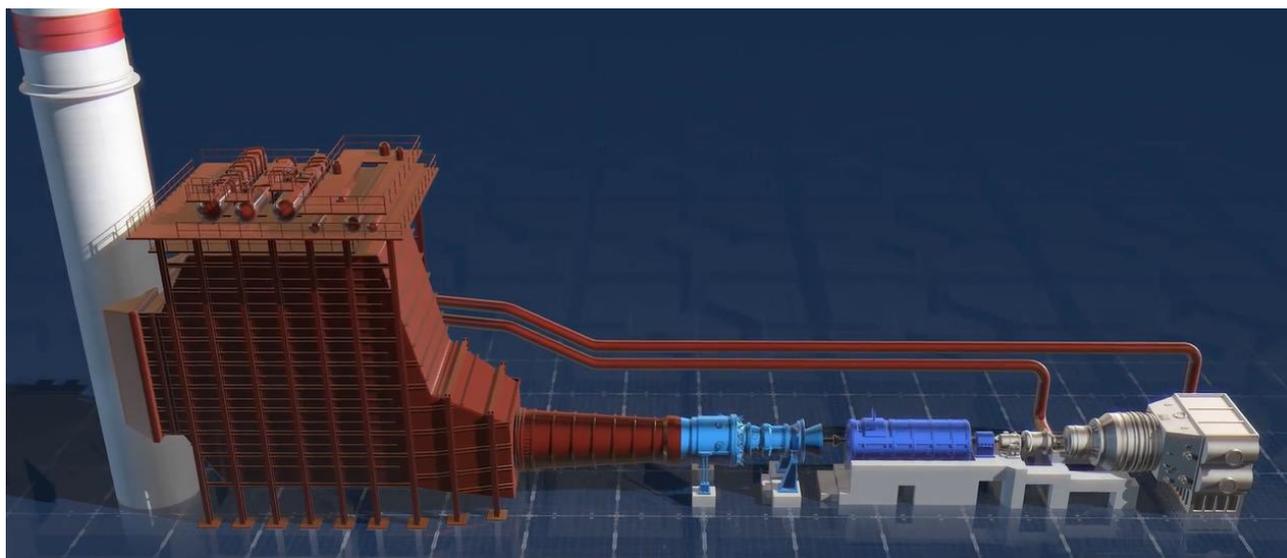
**А.И. Купреенко, Х.М. Исаев, С.М. Михайличенко**

# **Т Е П Л О Т Е Х Н И К А**

## **ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ**

### **Часть I**

Методические указания  
по выполнению практических и самостоятельных работ



Брянская область 2021

УДК 621.1.016 (076)

ББК 31.3

К 92

Купреенко, А. И. Теплотехника. Примеры решения задач: методические указания по выполнению практических и самостоятельных работ по дисциплине «Теплотехника» Ч. I. / А. И. Купреенко, Х. М. Исаев, С. М. Михайличенко. – Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2021. – 57 с.

Методические указания содержат теоретические положения, справочный материал и примеры решения задач для выполнения практических и самостоятельных работ по дисциплине «Теплотехника» и включает в себя три раздела: «Термодинамические параметры состояния», «Идеальные газы и основные газовые законы» и «Газовые смеси». Предназначено для студентов очной и заочной форм обучения направления подготовки 35.03.06 Агроинженерия, профили Технические системы в агробизнесе, Электрооборудование и электротехнологии, Технологическое оборудование для хранения и переработки сельскохозяйственной продукции, 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 методической комиссии инженерно-технологического института от 31 августа 2021 г., протокол № 1.*

© Брянский ГАУ, 2021

© Купреенко А.И., 2021

© Исаев Х.М., 2021

© Михайличенко С.М., 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие</b> .....	5
<b>Раздел 1. Термодинамические параметры состояния</b> .....	6
1.1. Краткие теоретические сведения .....	6
1.2. Задания для практических работ .....	10
1.3. Задания для самостоятельной работы .....	19
<b>Раздел 2. Идеальные газы и основные газовые законы</b> .....	26
2.1. Краткие теоретические сведения .....	26
2.2. Задания для практических работ .....	29
2.3. Задания для самостоятельной работы .....	36
<b>Раздел 3. Газовые смеси</b> .....	42
3.1. Краткие теоретические сведения .....	42
3.2. Задания для практических работ .....	45
3.3. Задания для самостоятельной работы .....	50
<b>Список литературы</b> .....	56

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

**УК-2:** Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений;

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

**ОПК-5:** Способен участвовать в проведении экспериментальных исследований в профессиональной деятельности.

Данные методические указания 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».

Данные методические указания включают в себя три раздела: «Термодинамические параметры состояния», «Идеальные газы и основные газовые законы» и «Газовые смеси». 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  $v$**  ( $\text{м}^3/\text{кг}$ ) – это объем, занимаемый единицей массы вещества. Данный параметр показывает, какой объем будет занимать 1 кг вещества.

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

где

$V$  – объем тела,  $\text{м}^3$ ;

$m$  – масса тела, кг.

Величина, обратная удельному объему, представляет собой массу единицы объема и называется *плотностью  $\rho$*  ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ):

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

**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 ( $\text{Па} = \text{Н}/\text{м}^2$ ) 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 <sup>2</sup>	1
килопаскаль	кПа	кН/м <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>
мегапаскаль	МПа	МН/м <sup>2</sup>	10 <sup>6</sup>
бар	бар	0,1 МН/м <sup>2</sup>	10 <sup>5</sup>
* килограмм-сила на квадратный метр	кгс/м <sup>2</sup>	9,81 Н/м <sup>2</sup>	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 <sup>2</sup>	98066,5
физическая атмосфера	атм	760 мм рт.ст.	101325
фунт-сила на квадратный дюйм	psi (lbs)	lbf/in <sup>2</sup>	6894,76

\* Под килограммом-силы понимают силу, которая сообщает покоящейся массе в 1 килограмм ускорение, равное нормальному ускорению свободного падения (9,80665 м/с<sup>2</sup>). 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  $B$  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  $p_{\text{изб}}$  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:

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

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

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:

$$p_{\text{абс}} = B - p_{\text{вак}},$$

где  $p_{\text{вак}}$  – 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

$\rho$  – плотность рабочей жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$\Delta h$  – 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:

$$T = t + 273,15 \text{ К}; \quad t = T - 273,15 \text{ }^\circ\text{С}.$$

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

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

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

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

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

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

## 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/см<sup>2</sup>, 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

### *Решение*

Для перевода единиц измерения воспользуемся таблицей 1.1:

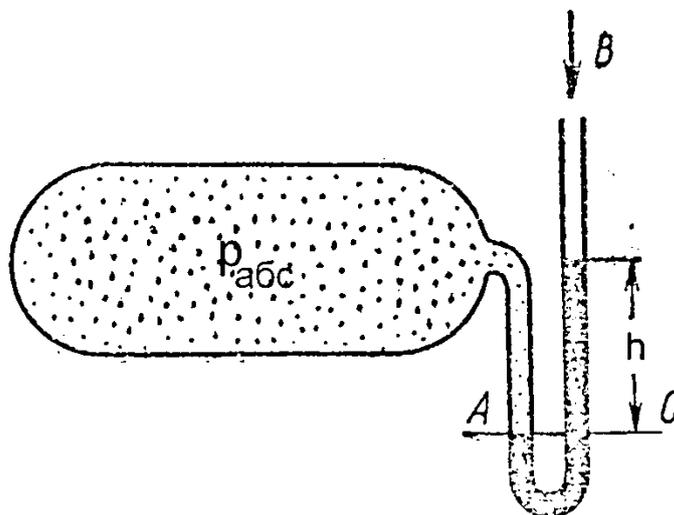
1 мм рт. ст. = 133,32 Па	→	748 мм рт.ст. · 133,32	= <b>99 723 Па;</b>
1 кПа = 10 <sup>3</sup> Па	→	99 723 Па / 10 <sup>3</sup>	= <b>99,7 кПа;</b>
1 МПа = 10 <sup>6</sup> Па	→	99 723 Па / 10 <sup>6</sup>	= <b>0,0997 МПа;</b>
1 бар = 10 <sup>5</sup> Па	→	99 723 Па / 10 <sup>5</sup>	= <b>0,997 бар;</b>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

**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 510 мм, а атмосферное давление  $B = 748$  мм рт.ст. Ответ представить в единицах измерения мм рт.ст., Па, ат, кгс/см<sup>2</sup>, 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



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

Воспользуемся формулой для вычисления абсолютного давления:

$$p_{абс} = B + p_{изб}.$$

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

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

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

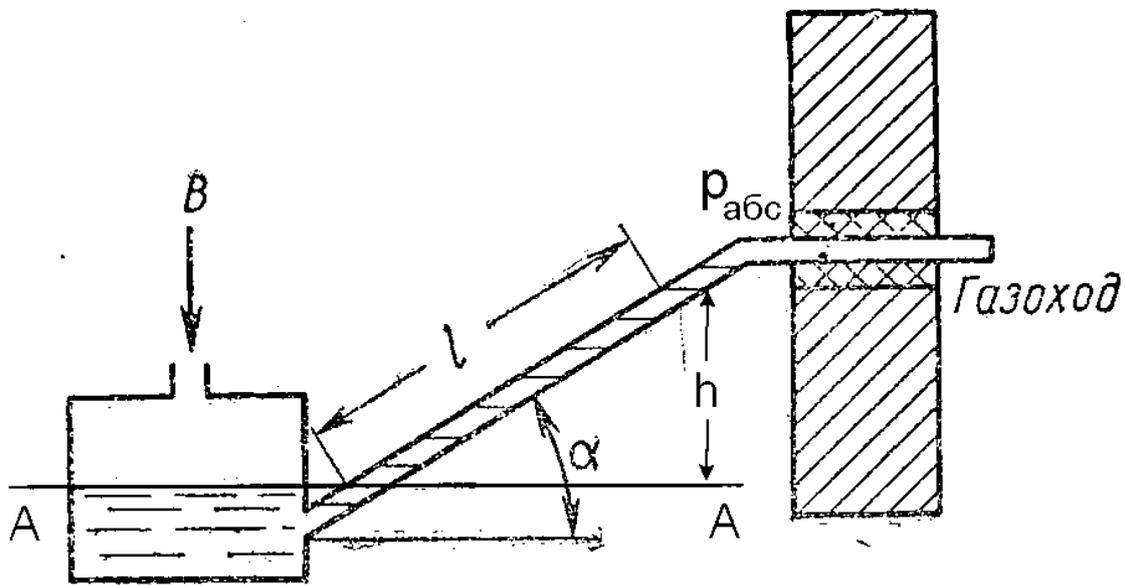
$$p_{абс} = 167\ 717 \text{ Па} / 6895 = \mathbf{24,3 \text{ psi.}}$$

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

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



*Решение*

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

Слева действует атмосферное давление  $B$ . Оно уравнивается 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  $p_{\text{вак}}$  определим на основании показаний тягомера (который по сути является чашечным вакуумметром) по формуле:

$$p_{\text{вак}} = \rho_{\text{в}} \cdot g \cdot h_{\text{в}}. \quad (2)$$

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.  $h_{\text{в}} = h$ .

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:

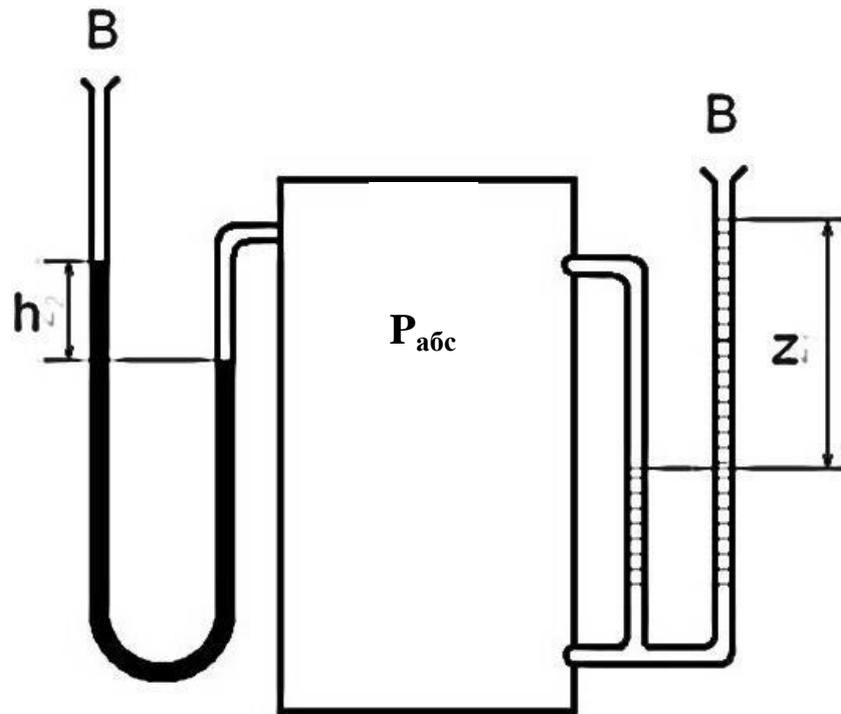
$$p_{\text{абс}} = 751 \cdot 133,32 \text{ Па} - 863,3 \text{ Па} = 99\,260 \text{ Па}.$$

**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  $h = 50 \text{ мм}$ . Атмосферное давление  $B = 756 \text{ мм рт.ст.}$ . 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  $\text{кгс/см}^2$ .

**Исходные данные для решения задачи № 1.4**

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$B$ , мм рт.ст.	745	746	747	748	749	750	751	752	753	754
$h$ , мм	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100



### *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:

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

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

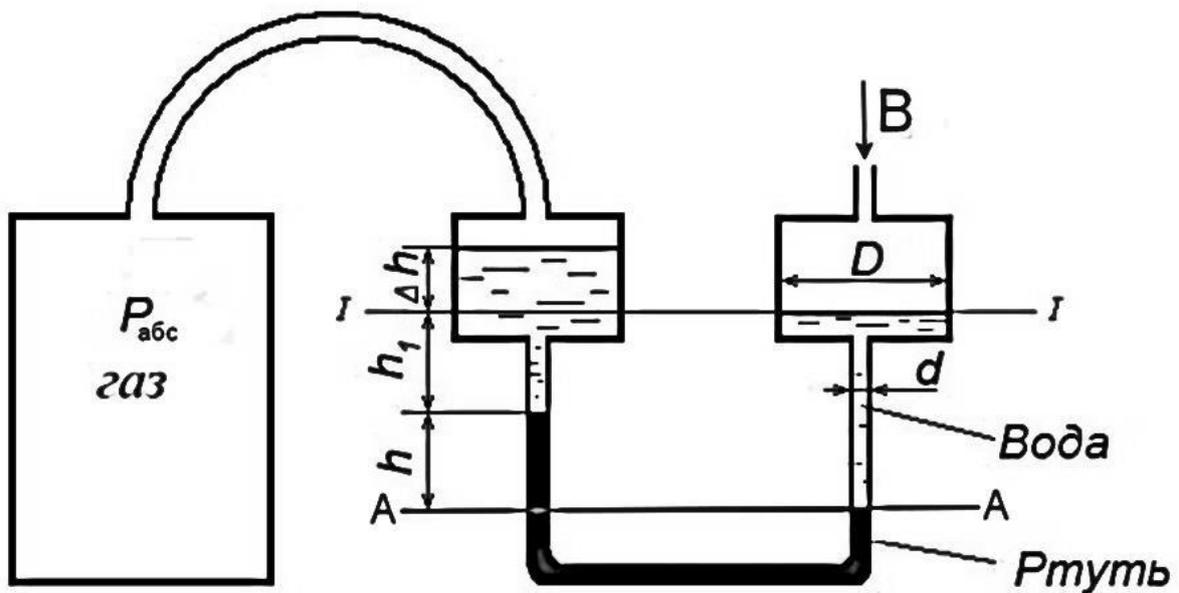
Полученные данные говорят о том, что столб ртути высотой 0,05 м и столб воды высотой 0,68 м (в 13,6 раза выше столба ртути) создают одинаковое давление, поскольку плотность воды в 13,6 раза меньше плотности ртути.

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

**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 ( $\rho_{\text{рт}} = 13600 \text{ кг/м}^3$ ) и водой ( $\rho_{\text{в}} = 1000 \text{ кг/м}^3$ ), 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
$d / D$	0,85	0,9	0,95	1,05	1,1	1,15	1,2	1,25	1,3	1,35
$h$ , мм	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
$B$ , мм рт.ст.	745	746	747	748	749	751	752	753	754	755



### 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  $p_{abc}$ , 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  $p_{abc}$ , действующее в сосуде, превышало атмосферное, данный прибор работал бы как манометр, т.е. показывал бы величину избыточного давления.

Для вычисления вакуумметрического давления воспользуемся формулой:

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

Для того, чтобы вычислить значение  $p_{абс}$ , 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 уравнивают 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  $p_{абс}$ , давления столба ртути высотой  $h$ , давления столба воды высотой  $(h_1 + \Delta h)$ :

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

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

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

Приравняем правые стороны этих выражений:

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

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

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

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

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

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

Подставляя вычисленное значение  $\Delta h$  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.	734	738	742	746	750	754	758	762	766	770

#### *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:

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

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

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

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

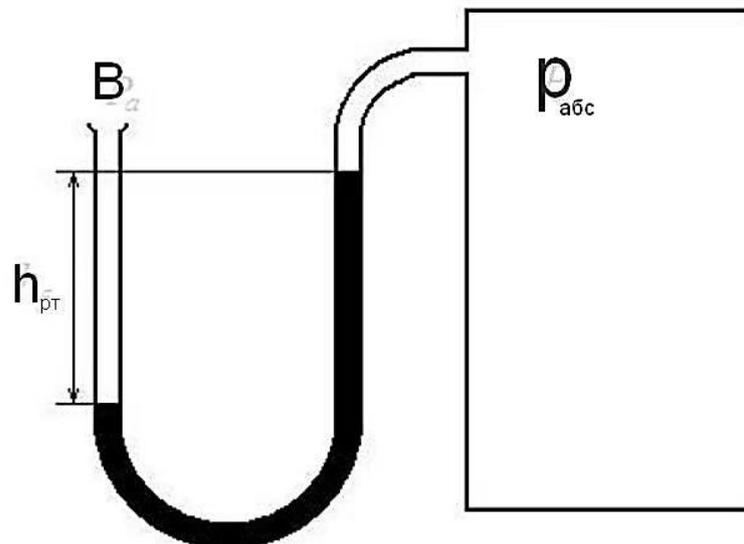
$$p_{\text{абс}} = 230\,257 \text{ Па} / 1\,000\,000 = \mathbf{0,23 \text{ МПа}}.$$

**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  $B = 755$  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
$h_{рт}, \text{ м}$	500	510	520	530	540	550	560	570	580	590
$B, \text{ м}$	748	749	750	751	752	753	754	756	757	758



*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 разрежения (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:

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

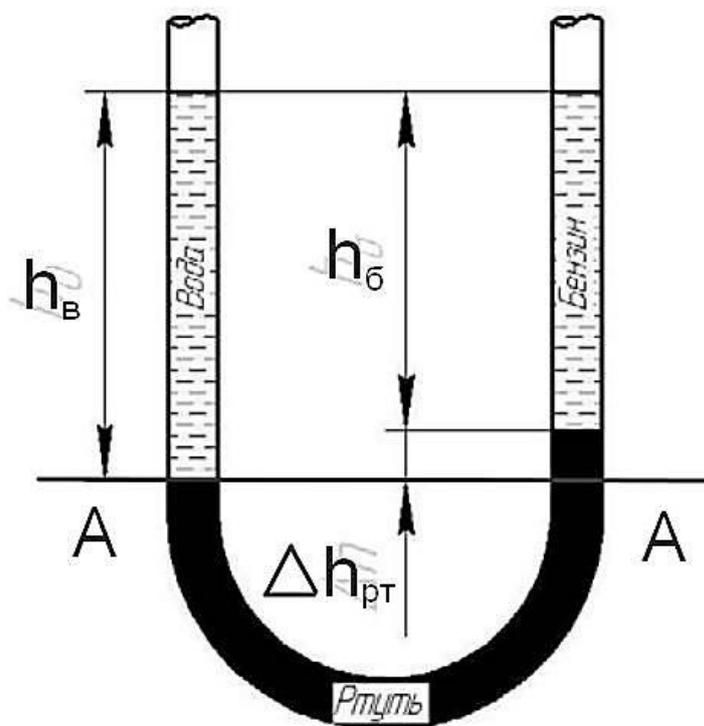
$$p_{\text{абс}} = 20\,665 \text{ Па} = 20,67 \text{ кПа} = 0,21 \text{ бар} = 0,02 \text{ МПа.}$$

**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  $h_{\text{в}} = 43 \text{ см}$ . 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



### *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  $\rho_B \cdot g \cdot h_B$  и  $\rho_{рт} \cdot g \cdot \Delta h_{рт}$ .

Из условия равенства этих давлений получаем:

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

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

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

Выразим  $\Delta h_{рт}$ :

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

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

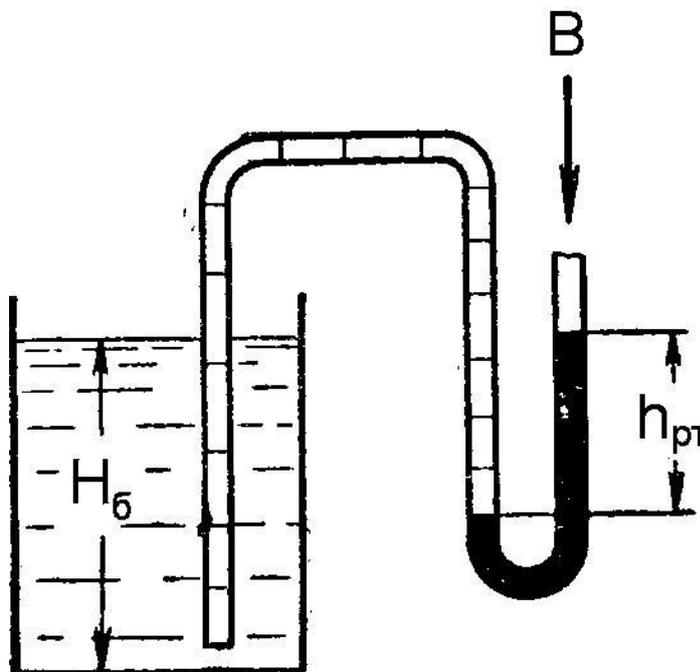
$$\Delta h_{рт} = 0,43 \cdot \frac{1000 - 700}{13600 - 700} = \frac{129}{12900} = 0,01 \text{ м.}$$

**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  $845 \text{ кг/м}^3$ , 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		
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	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  $h_{рт}$ :

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

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

**Ответ:**  $H_6 = 5,45 \text{ м}$ .

**1.11.** Температура насыщенного пара в камере парогенератора равна  $340 \text{ }^\circ\text{C}$  при давлении 146 бар. После прохождения пара через пароперегреватель его температура повысилась на  $210 \text{ }^\circ\text{C}$ . Выразить начальную и конечную температуру и изменение температуры в единицах измерения К,  $^\circ\text{C}$  и  $^\circ\text{F}$ .

***Исходные данные для решения задачи № 1.11***

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_n, \text{ }^\circ\text{C}$	280	285	290	295	300	305	310	315	320	325
$\Delta t, \text{ }^\circ\text{C}$	260	255	250	245	240	235	230	225	220	215

***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:

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

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

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

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

**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  $t_3 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Выразить эти значения в градусах Фаренгейта и градусах Кельвина.

### *Решение*

Приведем значения температур в соответствие шкале Фаренгейта:

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

$$t_3 = (9/5) \cdot (0 \text{ }^\circ\text{C}) + 32 = 32 \text{ }^\circ\text{F}.$$

Приведем значения температур в соответствие абсолютной шкале:

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

$$T_3 = 0 \text{ }^\circ\text{C} + 273 = 273 \text{ K}.$$

**Ответ:  $t_3 = 0 \text{ }^\circ\text{C} = 32 \text{ }^\circ\text{F} = 273 \text{ K}$ .**

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

## 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, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> 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):

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

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

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

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

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

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, м<sup>3</sup>;

$m$  – масса газа, кг;

$R$  – газовая постоянная, Дж/(кг·К);

$T$  – термодинамическая температура, К;

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

$V_\mu$  – объем одного киломоля газа, м<sup>3</sup>/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:

$$\frac{pV}{T} = mR = const \quad \text{или} \quad \frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2};$$
$$\frac{pv}{T} = R = const \quad \text{или} \quad \frac{p_1v_1}{T_1} = \frac{p_2v_2}{T_2}.$$

Газовая постоянная  $R$  для соответствующего газа находится по формуле:

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

где  $\mu$  – 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 $\mu$ , кг/кмоль	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Газовая постоянная $R$ , Дж / (кг · К)
Воздух	–	28,96	1,293	287,0
Кислород	O <sub>2</sub>	32,00	1,429	259,8

Продолжение таблицы 2.1

Азот	N <sub>2</sub>	28,026	1,251	296,8
Гелий	He	4,003	0,179	2078,0
Аргон	Ar	39,994	1,783	208,2
Водород	H <sub>2</sub>	2,016	0,090	4124,0
Окись углерода	CO	28,01	1,250	296,8
Двуокись углерода	CO <sub>2</sub>	44,01	1,977	188,9
Сернистый газ	SO <sub>2</sub>	64,06	2,926	129,8
Метан	CH <sub>4</sub>	16,032	0,717	518,8
Этилен	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28,052	1,251	296,6
Коксовый газ	–	11,50	0,515	721,0
Аммиак	NH <sub>3</sub>	17,032	0,771	488,3

## 2.2. ЗАДАНИЯ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ

**2.1.** Чему равен объем 1 кг азота при температуре  $t = 70$  °С и избыточном давлении  $p_{\text{изб}} = 0,1$  МН/м<sup>2</sup>. Значение атмосферного давления  $B = 1$  бар.

### *Исходные данные для решения задачи № 2.1*

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Вещество	O <sub>2</sub>	He	H <sub>2</sub>	Ar	NH <sub>3</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	Воздух	SO <sub>2</sub>	CO
$t, ^\circ\text{C}$	18	45	34	62	-13	134	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	0,2

### *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 Дж = Н·м, Па = Н/м<sup>2</sup> :

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

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 ( $B = 760$  мм рт.ст.,  $t = 0$  °С).

***Исходные данные для решения задачи № 2.2***

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Вещество	CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	He	O <sub>2</sub>	CO	NH <sub>3</sub>	H <sub>2</sub>	Ar	SO <sub>2</sub>	Воздух
$t, ^\circ\text{C}$	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

***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  $\rho_1$  и  $\rho_2$ :

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

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

Сравним полученные значения плотностей воздуха  $\rho_1$  и  $\rho_2$  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  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ . Определить объемный расход воздуха на выходе из воздухоподогревателя, если его нагрев производится до температуры  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  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
$t_1, \text{ }^\circ\text{C}$	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
$t_2, \text{ }^\circ\text{C}$	470	460	450	440	430	420	410	390	380	370

### Решение

Рассмотрим процесс следующим образом: имелся объем воздуха  $V_1$  при температуре  $t_1 = 30\text{ }^\circ\text{C}$  → после прохождения воздуха через воздухонагреватель его температура возросла до значения  $t_2 = 400\text{ }^\circ\text{C}$  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  $127\text{ }^\circ\text{C}$  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
$t, \text{ }^\circ\text{C}$	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

### 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

$$pv = RT,$$

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

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

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

Подставим найденное значение  $\rho$  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:**  $G = 138\,600$  кг/ч.

**2.5.** В цилиндре диаметром 60 см содержится 0,41 м<sup>3</sup> 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
$d$ , см	73	62	75	48	100	25	58	41	85	18
$V$ , м <sup>3</sup>	1,2	0,6	3,1	1,5	2,2	1,8	2,6	3,4	0,3	0,8
$\Delta h$ , см	24	61	-31	32	15	-10	57	-22	9	19

#### *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  $\Delta V$  до значения  $V_2$ , а

поршень переместился на расстояние  $\Delta h = 40$  см (при отрицательном значении  $\Delta h$  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  $\Delta V$ :

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

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  $1 \text{ м}^3$  при атмосферном давлении  $B = 750$  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
$B, \text{ мм рт.ст.}$	743	761	748	752	739	741	755	742	754	746
$t, \text{ }^\circ\text{С}$	-12	18	36	-10	15	26	-22	-4	14	19

### 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:

$$P_A = \rho gV, \quad (1)$$

где

$\rho$  – плотность жидкости (газа), в которую погружено тело,  $\text{кг/м}^3$ ;

$g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ ;

$V$  – объем погруженной в жидкость (газ) части тела,  $\text{м}^3$ .

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 ( $\text{H}_2$ ) и гелия ( $\text{He}$ ) примет вид:

$$F_{\text{H}_2} = gV\rho_{\text{возд.}} - gV\rho_{\text{H}_2} = gV(\rho_{\text{возд.}} - \rho_{\text{H}_2}); \quad (3)$$

$$F_{\text{He}} = gV\rho_{\text{возд.}} - gV\rho_{\text{He}} = gV(\rho_{\text{возд.}} - \rho_{\text{He}}).$$

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

$$pv = RT \rightarrow \frac{p}{\rho} = RT;$$

$$\rho = \frac{p}{RT}. \quad (4)$$

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

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

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

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 °С, 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 <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	O <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	Ar	CO	Воздух	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>
V, л	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
t, °С	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15
p <sub>изб</sub> , бар	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11

### 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:  $m = 0,91$  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 <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	Воздух	CO <sub>2</sub>	CO	SO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	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

### 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  $420 \text{ мм рт.ст.}$  при неизменной температуре. Показания барометра составляют  $768 \text{ мм рт.ст.}$

### *Исходные данные для решения задачи № 2.9*

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V$ , л	150	200	250	300	350	400	450	550	600	650
$p_{\text{изб}}$ , бар	9	8,5	8,0	7,5	7,0	6,5	6,0	5,5	5,0	4,5
$t$ , $^\circ\text{C}$	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$p_{\text{вак}}$ , кПа	18	23	28	33	38	43	48	53	58	63
$B$ , мм рт.ст.	743	761	748	752	739	741	755	742	754	746

### *Решение*

Вычислим значения абсолютного давления для двух состояний воздуха:

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

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

Вспользуемся 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 м<sup>3</sup>. 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.	741	746	755	761	748	742	752	739	743	754
$p_2$ , 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 <sup>3</sup>	64	25	18	41	39	32	14	56	44	51

**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:**  $\Delta m = 390,8 \text{ кг.}$

**2.11.** Баллон объемом 20 литров заполнен кислородом. Показания манометра составляют 9 МН/м<sup>2</sup> при температуре кислорода 15 °С. После израсходования части кислорода давление снизилось до 6,6 МН/м<sup>2</sup>, 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

### *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:

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

$$m_2 = \frac{p_2 V}{RT_2} = \frac{6699,3 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot 20 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3}{259,8 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 283 \text{ К}} = 1,82 \text{ кг.}$$

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  $764 \text{ мм рт.ст.}$ , 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
$d, \text{ см}$	25	48	73	62	41	58	18	100	75	85
$h, \text{ м}$	1,2	4,6	3,1	1,5	2,2	1,8	2,6	3,4	4,3	4,8
$t, \text{ }^\circ\text{C}$	24	61	-3	32	15	-10	57	9	-22	19
$B, \text{ мм рт.ст.}$	731	752	761	748	739	754	736	743	755	746
$p, \text{ бар}$	11,5	10,1	13,8	7,9	16,2	14,3	17,5	3,2	18,0	22,6

### *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  $p$ :

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

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

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

**Ответ:**  $m = 7,06 \text{ кг}$ .

## 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/м<sup>3</sup>) 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:  $\text{CO}_2$  – 12,2 %,  $\text{O}_2$  – 7,1 %,  $\text{CO}$  – 0,4 %,  $\text{N}_2$  – 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

#### *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:

$$g_i = \frac{r_i \mu_i}{r_{CO_2} \mu_{CO_2} + r_{O_2} \mu_{O_2} + r_{CO} \mu_{CO} + r_{N_2} \mu_{N_2}}. \quad (2)$$

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

$$\mu_{CO_2} = 44 \text{ кг/кмоль}, \mu_{O_2} = 32 \text{ кг/кмоль}, \mu_{CO} = 28 \text{ кг/кмоль}, \mu_{N_2} = 28 \text{ кг/кмоль}.$$

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

$$g_{CO_2} = \frac{0,122 \cdot 44}{0,122 \cdot 44 + 0,071 \cdot 32 + 0,004 \cdot 28 + 0,803 \cdot 28}.$$

$$g_{CO_2} = \frac{5,37}{30,24} = 0,177 = 17,7 \%.$$

$$g_{O_2} = \frac{0,071 \cdot 32}{30,24} = 0,075 = 7,5 \%.$$

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

$$g_{N_2} = \frac{0,803 \cdot 28}{30,24} = 0,744 = 74,4 \%.$$

Правильность расчетов проверим по условию:

$$\sum_{i=1}^n g_i = g_{CO_2} + g_{O_2} + g_{CO} + g_{N_2} = 1;$$

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

**Ответ:**  $g_{CO_2} = 0,177 = 17,7 \%$ ;  $g_{O_2} = 0,075 = 7,5 \%$ ;  
 $g_{CO} = 0,004 = 0,4 \%$ ;  $g_{N_2} = 0,744 = 74,4 \%$ .

**3.2.** В состав газовой смеси входят водород и окись углерода. Массовая доля водорода  $g_{H_2} = 6,67 \%$ . 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
$g_{H_2}, \%$	13,1	24,8	11,9	8,7	31,3	15,6	23,2	17,9	29,0	14,4

*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

### 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
$B$ , мм рт.ст.	734	738	742	746	750	754	758	762	766	770

**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:

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

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

Кажущуюся молекулярную массу смеси вычислим из выражения

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

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

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: CO<sub>2</sub> – 18 %, O<sub>2</sub> – 12 %, N<sub>2</sub> – 70 %. До какого давления нужно сжать эту смесь массой 8 кг, чтобы при температуре 180 °С ее объем занимал 4 м<sup>3</sup>, если изначально она находится при нормальных условиях? Ответ представить в паскалях.

#### *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

#### *Решение*

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

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

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

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

#### *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  $120 \text{ м}^3$  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  $0,3 \text{ МПа}$ , а температура упала до  $13 \text{ }^\circ\text{C}$ . 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  $p_1 = 0,5 \text{ МПа}$  и  $p_2 = 0,3 \text{ МПа}$ .

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  $R_{\text{см}}$  коксового газа с заданным составом. Для этого воспользуемся следующей формулой:

$$R_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n g_i R_i = g_{\text{H}_2} R_{\text{H}_2} + g_{\text{CH}_4} R_{\text{CH}_4} + g_{\text{CO}} R_{\text{CO}} + g_{\text{N}_2} R_{\text{N}_2}. \quad (3)$$

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  $\mu_i$  для каждого из компонентов газовой смеси можно определить по таблице Менделеева или по табличным данным:

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

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  $R_{см}$ :

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

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

Найденное значение  $R_{\text{см}}$  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:**  $\Delta m = 117,6 \text{ кг}$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амерханов Р.А., Драганов Б.Х. Теплотехника: учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: 2006. 432 с.
2. Купреенко А.И., Исаев Х.М., Михайличенко С.М. Гидрогазодинамика. Примеры решения задач: метод. указания по выполнению практ. и самостоятельных работ по дисциплине «Гидрогазодинамика». Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2020. 48 с.
3. Рудобашта С.П. Теплотехника. М.: КолосС, 2010. 599 с.
4. Чащинов В.И. Практикум по теплотехнике: учеб. пособие для студентов агроинженерных специальностей. Брянск: Изд. Брянская ГСХА, 2009. 86 с.
5. Чащинов В.И. Теплотехника: учеб. 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.

Учебное издание

Купреенко Алексей Иванович,  
Исаев Хафиз Мубариз-оглы,  
Михайличенко Станислав Михайлович

# **Т Е П Л О Т Е Х Н И К А**

## **ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ**

### **Часть I**

Методические указания  
по выполнению практических и самостоятельных работ

Редактор Осипова Е.Н.

---

Подписано к печати 09.11.2021 г. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Усл. п. л. 3,31. Тираж 25 экз. Изд. № 7059.

---

Издательство Брянского государственного аграрного университета  
243365 Брянская обл., Выгоничский район, с. Кокино, Брянский ГАУ