

Высшее профессиональное образование

БАКАЛАВРИАТ

СБОРНИК ЗАДАЧ ПО ТЕПЛОТЕХНИКЕ

Под редакцией доктора технических наук,
профессора М. Г. ШАТРОВА

*Учебное пособие
для студентов учреждений
высшего профессионального образования
по направлениям подготовки бакалавров
«Эксплуатация транспортных средств»
и «Эксплуатация транспортно-технологических
машин и комплексов»*



Москва
Издательский центр «Академия»
2012

УДК 621.1(075.8)
ББК 31.3я73
С232

Рецензенты:

проф. кафедры «Теплотехника» МГТУ им. Н.Э.Баумана,
д-р техн. наук *В.А.Марков*;
зав. кафедрой «Тракторы и автомобили» ФГОУ ВПО МГАУ,
д-р техн. наук, проф. *С.Н.Девянин*

С232

Сборник задач по теплотехнике : учеб. пособие для студ. учреждений высш. проф. образования / М. Г. Шартов, И. Е. Иванов, С. А. Пришвин и др. ; под ред. М. Г. Шартова. — М. : Издательский центр «Академия», 2012. — 272 с. — (Сер. Бакалавриат).

ISBN 978-5-7695-8566-1

Учебное пособие создано в соответствии с государственными образовательными стандартами по направлениям подготовки бакалавров «Эксплуатация транспортных средств» и «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов».

Сборник содержит задачи по технической термодинамике и теплообмену. По каждой теме приведены краткие теоретические сведения и расчетные формулы; типовые задачи повышенной сложности даны с подробным решением и в некоторых случаях с иллюстрацией. Представлены задачи для самостоятельного решения с ответами.

Приложение содержит необходимые для решения задач справочные материалы в форме таблиц, графиков и аппроксимирующих математических выражений.

Для студентов учреждений высшего профессионального образования.

УДК 621.1(075.8)
ББК 31.3я73

*Оригинал-макет данного издания является собственностью
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение
любым способом без согласия правообладателя запрещается*

© Коллектив авторов, 2012
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2012
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2012

ISBN 978-5-7695-8566-1

ВВЕДЕНИЕ

Теплотехника является компонентом базовой части математического и естественно-научного цикла подготовки студентов высших учебных заведений. На ее основе базируется значительное число специальных дисциплин профессионального цикла подготовки студентов, обучающихся по направлению 190600 «Эксплуатация наземного транспорта и транспортного оборудования», по специальностям 190601 «Автомобили и автомобильное хозяйство», 190603 «Сервис транспортных и технологических машин и оборудования».

При изучении теплотехники должна формироваться мотивация обучаемых на экономии невозобновляемых энергетических ресурсов и снижении теплового «загрязнения» среды обитания при проведении тепловых процессов.

Практическая деятельность выпускников технических высших учебных заведений в области теплотехники сводится к оценке ситуации, выбору средств для описания процесса или явления, получению численных значений, анализу полученных результатов и принятию компетентных решений. Поэтому в процессе изучения теплотехники важнейшим является применение полученных теоретических знаний при решении практических задач.

Данный сборник задач входит в состав учебно-методического комплекта, формирование которого базируется на учебниках «Теплотехника», изданных авторами в Издательском центре «Академия» (2008) и издательстве «Высшая школа» (2009).

Сборник задач поможет студенту преобразовать знания, полученные при освоении теоретической части дисциплины на лекциях и при самостоятельной работе с учебником, в практические навыки работы в области теплотехники. В результате студент должен:

уметь выполнять теплотехнические расчеты по термодинамике и теплообмену, а также анализировать и давать качественные и количественные оценки полученных результатов;

владеть основами системно-логического метода изучения процессов преобразования энергии в формах теплоты и работы, а также методами передачи и использования теплоты в технике и природе;

иметь навыки работы с учебно-методическим и информационным обеспечением дисциплины.

Решение задач **раздела «Термодинамика»** позволит освоить методики:

- определения параметров и энергетических составляющих газов и их смесей в различных термодинамических процессах;
 - расчета термодинамических циклов тепловых машин (поршневых и газотурбинных двигателей, паросиловых и холодильных установок, а также кондиционеров);
 - оценки влияния различных параметров на энергетические и экономические показатели циклов и определения их оптимальной совокупности;
 - сравнения термодинамических циклов для одинаковых условий.
- Решение задач **раздела «Теплообмен»** позволит:
- освоить методики расчета передачи теплоты в процессах теплопроводности, конвекции, теплового излучения, а также в комбинированных процессах теплоотдачи и теплопередачи;
 - определять методы и средства уменьшения потерь теплоты из отапливаемых помещений, при транспортировке горячих теплоносителей (жидкостей, паров и газов) в различных технологических процессах;
 - находить методы и средства интенсификации теплопередачи, например в теплообменных аппаратах и отопительных системах;
 - выполнять анализ методов и средств защиты объектов от теплового воздействия.

В каждом разделе книги последовательно представлены:

- теоретическая часть, содержащая минимум теоретической информации, основные расчетные зависимости, необходимые справочные данные, часть которых вынесена в приложения;
- примеры решения задач, содержащие типовые методики решения, характерные для данного раздела;
- набор задач для самостоятельного решения, содержащих ответы.

Большая часть приведенных задач разработана авторами, а ряд заимствован из известных источников, в частности из [6, 8, 10].

Абстрактные задачи, которые не связаны с реальными физическими процессами или явлениями, происходящими в природе и в технической сфере, даны в минимальном объеме. В сборник включены задачи общего научно-познавательного характера и задачи, описывающие процессы, характерные для предметной области профессиональной деятельности студентов.

Полученные результаты решения задачи позволят расширить познания обучаемого о тепловых процессах в окружающем мире, а также о различных технических устройствах в целом и в автомобильной технике, в частности.

В книге приведены задачи различного уровня сложности. Отдельные задачи требуют комплексного использования ряда методик расчетов.

Постоянный рост сложности и многообразия теплотехнических решений, используемых в современном обществе и в жизненном

цикле современных автомобилей, требует формирования новых задач, например о тепловых насосах или об автомобильных кондиционерах.

Авторы стремились сформировать данную книгу таким образом, чтобы ее можно было использовать при различных образовательных технологиях и средствах обучения:

- на аудиторных групповых занятиях или при индивидуальной самостоятельной работе студента;
- с использованием вычислительных средств различного уровня — от калькулятора до компьютера.

Ряд задач можно использовать комплексно: каждый студент самостоятельно рассчитывает один вариант, а на групповых занятиях отдельные результаты объединяют и обсуждают, как влияет изменяемый фактор на анализируемые показатели. Такая технология может быть реализована, например, при оценке изменения состава продуктов сгорания и их долей в продуктах сгорания от исходного состояния при разных соотношениях топливо/воздух.

Для повышения эффективности обучения теплотехнике в книге использованы современные информационные технологии, к числу которых по мнению авторов относятся следующие:

- разработка платформ, позволяющих объединить и комплексно использовать все компоненты учебного процесса (лекции, практические занятия, лабораторные работы, промежуточный и финишный контроль знаний). Примером такого дидактического средства является интегрированный обучающий комплекс (ИОК) «Теплотехника», разрабатываемый в МАДГТУ (МАДИ) на кафедре «Теплотехника и автотракторные двигатели». Комплекс в настоящее время содержит циклы компьютерных лекций «Термодинамические циклы поршневых ДВС», «Термодинамические циклы поршневых ДВС с наддувом». Лабораторный практикум содержит следующие работы: определение коэффициента теплопроводности; исследование процесса конвективной теплоотдачи; определение степени черноты твердого тела; теплотехнический расчет ограждающих конструкций одноэтажного здания;
- замена использования традиционных таблиц по теплотехническим свойствам материалов работой с базами данных;
- визуализация различных диаграмм (sT , sh) и работа с ними интерактивно на экране компьютера или на электронной доске;
- использование интернет-ресурсов, включающее применение удаленных вычислительных комплексов на основе доступа к высокоскоростному Интернету.

Сборник задач можно использовать в полном объеме (прежде всего для специальностей, обеспечивающих эксплуатацию и сервис автомобилей) или фрагментарно при аудиторных занятиях или самостоятельно студентами высших учебных заведений, обучающимся по всем механическим специальностям, обеспечивающим

потребности транспортной энергетики: по направлению «Наземные транспортные системы», специальностям «Автомобиле- и тракторостроение», «Автомобили и автомобильное хозяйство», «Машины инженерного вооружения»; по направлению «Энергомашиностроение», специальности «Двигатели внутреннего сгорания»; по направлению «Технологические машины и оборудование», специальности «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование»; по направлению «Эксплуатация транспортных средств», специальности «Сервис и техническая эксплуатация транспортных и технологических машин и оборудования» (автомобильный транспорт; строительное, дорожное и коммунальное машиностроение); по направлению «Организация перевозок и управление на транспорте, специальности «Организация перевозок и управление на транспорте (автомобильный транспорт)», «Организация и безопасность дорожного движения (автомобильный транспорт)»; по направлению подготовки «Экономика и управление», специальности «Экономика и управление на предприятии» (на транспорте, в строительстве).

Авторы выражают благодарность за ценные советы рецензентам: д-ру техн. наук, проф. В. А. Маркову и д-ру техн. наук, проф. С. Н. Девянину за большой труд по рецензированию сборника задач.

Авторы будут благодарны за все замечания и предложения по улучшению содержания данной книги, которые можно направлять по адресу: Российская Федерация, Москва, 125829, Ленинградский проспект, 64, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), кафедра «Теплотехника и авто-тракторные двигатели». Тел. +7 (499) 155-03-61, 155-99-79 (кафедра), 155-08-81 (лаборатория информационных технологий в инженерном образовании). Тел./факс: (499) 155-99-79. E-mail: dvs@madi.ru.

I. ТЕРМОДИНАМИКА

1. Параметры состояния. Уравнения состояния

Основными параметрами состояния термодинамической системы являются: абсолютное давление p (Па), абсолютная температура T (К), удельный объем v (м³/кг) или плотность ρ (кг/м³).

Давление — величина, равная отношению силы P , равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности, к площади A этой поверхности: $p = P/A$. Основная единица измерения давления 1 Па (паскаль) = 1 Н/м² (ньютон/м²). Ввиду малости этой единицы чаще используют кратные единицы давления: 1 кПа = 10³ Па или 1 МПа = 10⁶ Па. Вместе с тем используют внесистемные единицы: бар, техническая атмосфера (1 техн. атм. = 1 кгс/см² (килограмм-сила)/см² — избыточное давление и ата = 1 кгс/см² — абсолютное давление); мм ртутного столба (мм рт. ст.), мм водяного столба (мм вод. ст.) и др. Коэффициенты соотношения между единицами давления различной размерности представлены в табл. 1.1.

Атмосферное давление измеряют барометром и называют барометрическим (p_6). При измерении атмосферного давления ртутным барометром его показания B_r (мм рт. ст.) при темпера-

Таблица 1.1

Величина	Н/м ² = Па	Бар	Техническая атмосфера	Физическая атмосфера	мм рт. ст.	мм вод. ст.
1 Па	1	10 ⁻⁵	1,02 · 10 ⁻⁵	0,987 · 10 ⁻⁵	7,5 · 10 ⁻³	0,102
1 бар	10 ⁵	1	1,02	0,987	750	1,02 · 10 ⁴
1 техн. атм.	9,81 · 10 ⁴	0,981	1	0,968	735,6	10 ⁴
1 физ. атм.	1,013 · 10 ⁵	1,013	1,0332	1	760	1,0332 · 10 ⁴
1 мм рт. ст.	133,32	133,32 · 10 ⁻⁵	1,36 · 10 ⁻³	1,31 · 10 ⁻³	1	13,6
1 мм вод. ст.	9,81	9,81 · 10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	0,968 · 10 ⁻⁴	7,356 · 10 ⁻²	1

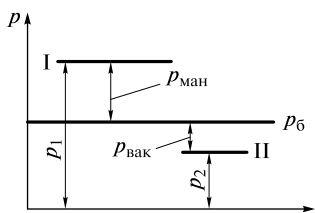


Рис. 1.1. Схема определения абсолютного давления в сосуде:

I — абсолютное давление в сосуде при избыточном давлении в нем; II — абсолютное давление при разрежении в сосуде; $p_б$ — барометрическое давление; $p_{ман}$ — манометрическое (избыточное) давление; $p_{вак}$ — вакуумметрическое давление (разрежение); p_1, p_2 — абсолютные давления

туре измерения t ($^{\circ}\text{C}$) необходимо привести к температуре 0°C по формуле

$$B_0 = B_t(1 - 0,000172t_6),$$

где B_t — барометрическое давление, измеренное при температуре t_6 в $^{\circ}\text{C}$, мм рт. ст.; $0,000172^{\circ}\text{C}^{-1}$ — коэффициент объемного расширения ртути.

Барометрическое давление в системе СИ $p_б = 133,32B_0$, Па.

Давление, превышающее атмосферное (избыточное давление), измеряют *манометром* ($p_{ман}$), а давление ниже атмосферного (разрежение) — *вакуумметром* ($p_{вак}$).

В этих случаях абсолютное давление определяют по показаниям двух приборов (рис. 1.1):

- при избыточном давлении

$$p_1 = p_б + p_{ман}; \quad (1.1)$$

- при разрежении

$$p_2 = p_б - p_{вак}. \quad (1.2)$$

С увеличением высоты над уровнем моря в пределах тропосферы (до 11 000 м) изменение барометрического давления подчиняется следующей зависимости:

$$p_б = p_{б0} \left(1 - \frac{H}{44\,300} \right)^{5,256}, \quad (1.3)$$

где $p_{б0}$ — барометрическое давление на уровне моря; H — высота над уровнем моря, м.

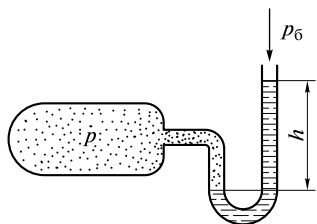


Рис. 1.2. Измерение избыточного давления U-образным манометром (пьезометром)

Для измерения небольших перепадов давления можно использовать пьезометры — жидкостные манометры или вакуумметры, представляющие собой U-образные трубки, заполненные рабочей жидкостью (вода, спирт, ртуть и др.). Соединяя один конец трубки с пространством сосуда, в котором находится газ, а другой — с окружающей средой, по разности уровней жидкости h в трубке (рис. 1.2) определяют разность между абсолютным давлением газа p в сосуде и давлением окружающей среды $p_б$.

Абсолютное давление в сосуде определяют по следующим формулам:

- при избыточном давлении

$$p = p_6 + \rho gh; \quad (1.4)$$

- при разрежении

$$p = p_6 - \rho gh, \quad (1.5)$$

где g — ускорение свободного падения, м/с^2 ; ρ — плотность рабочей жидкости манометра или вакуумметра, кг/м^3 ; h — высота столба жидкости, м .

Высота h прямо пропорциональна разности давления газа в сосуде и давления окружающей среды и обратно пропорциональна плотности жидкости. Значения плотности, как правило, указывают при температуре 0°C (ρ_0) (для воды $\rho_0 = 1000 \text{ кг/м}^3$, а для ртути — $13\,595 \text{ кг/м}^3$).

Плотность ртути существенно зависит от температуры, поэтому показания ртутного пьезометра приводят к 0°C по формуле

$$h_0 = h(1 - 0,000172t). \quad (1.6)$$

По аналогичной формуле можно определить плотность ртути в момент измерения:

$$\rho = \rho_0(1 - 0,000172t). \quad (1.7)$$

Для измерения малых давлений используют микроманометры (рис. 1.3), в которых благодаря наклонной установке трубки 1 под углом φ к горизонтали малые изменения давления приводят к значительным перемещениям уровня рабочей жидкости, определяемой длиной l , что повышает точность измерения.

Значение манометрического давления рассчитывают с учетом угла установки трубки:

$$p_{\text{ман}} = l\rho g \sin \varphi. \quad (1.8)$$

Температура, являясь мерой интенсивности теплового движения микрочастиц, характеризует тепловое состояние тела и определяет направление самопроизвольного теплообмена между телами.

Для определения температуры в настоящее время существует несколько температурных шкал. Температурная шкала Цельсия имеет две реперные точки: таяние льда ($t_0 = 0^\circ\text{C}$) и кипение воды ($t_{\text{кип}} = 100^\circ\text{C}$) при нормальном атмосферном давлении (760 мм рт. ст.). В шкале Фаренгейта, применяемой в США, Великобритании и других странах, приняты те же реперные точки, что и в шкале Цельсия, но им приписаны значения соответственно 32 и 212°F . Следовательно,

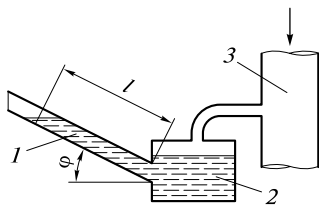


Рис. 1.3. Схема микроманометра:

1 — наклонная трубка; 2 — рабочая камера; 3 — газопровод

$1^{\circ}\text{F} = \frac{5}{9}^{\circ}\text{C}$. В шкале Ранкина (Ренкина), используемой в США, температуре $t_0 = 0^{\circ}\text{C}$ соответствует $t_0 = 491,76^{\circ}\text{R}$, а $t_{\text{кип}} = 100^{\circ}\text{C}$ — температура $t_{\text{кип}} = 671,67^{\circ}\text{R}$. При этом $1^{\circ}\text{C} = 1,8^{\circ}\text{R}$.

Шкалу Кельвина — шкалу абсолютной температуры — *применяют во всех термодинамических расчетах*. В этой шкале температуре $t_0 = 0^{\circ}\text{C}$ соответствует температура $T = 273,15\text{ K}$, а $t_{\text{кип}} = 100^{\circ}\text{C}$ — температура $T = 373,15\text{ K}$. Единица измерения 1 К (кельвин) = 1°C , т.е. разность температур может быть выражена как в градусах Цельсия, так и в кельвинах, так как цена деления и по одной, и по другой шкале одинакова. Пересчет показаний термометров из одной шкалы в другую осуществляется по формулам:

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9}(t^{\circ}\text{F} - 32), \text{ или } t^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5}t^{\circ}\text{C} + 32; \quad (1.9)$$

$$T = t^{\circ}\text{C} + 273,15; \quad (1.10)$$

$$T\text{ K} = \frac{5}{9}t^{\circ}\text{R}. \quad (1.11)$$

С повышением высоты H над уровнем моря температура T_H уменьшается. В пределах тропосферы она определяется по выражению

$$T_H = T_0 - 0,0065H.$$

Плотность вещества ρ — масса, заключенная в единице объема:

$$\rho = \frac{M}{V}, \quad (1.12)$$

где M — масса вещества, кг; V — объем, м^3 .

Удельный объем v — объем единицы массы; v — величина, обратная плотности:

$$v = \frac{1}{\rho} = \frac{V}{M}. \quad (1.13)$$

Очевидно соотношение:

$$v\rho = 1. \quad (1.14)$$

Плотность и удельный объем относятся к физическим параметрам рабочих тел (веществ). Поскольку значения v и ρ зависят от температуры и давления, то в справочниках, как правило, приводятся их значения v_0 и ρ_0 при *нормальных физических условиях* (НФУ), т.е. при $T_0 = 273,15\text{ K}$ (0°C) и $p_0 = 101\,325\text{ Па}$ (760 мм рт. ст.).

Уравнение, устанавливающее связь между давлением, температурой и удельным объемом (плотностью) среды постоянного состава, называется *уравнением состояния*. Наиболее простой вид это уравнение имеет для идеального газа. Под *идеальным* понимается газ, молекулы которого рассматриваются как материальные точки, взаимодействие между ними ограничивается абсолютно упругими соударениями. Считается, что молекулы идеального газа не имеют

объема и между ними отсутствуют силы притяжения или отталкивания. Реальные газы приближаются к идеальным при низких давлениях и относительно высоких температурах.

Для 1 кг идеального газа уравнение состояния имеет вид

$$pv = RT, \text{ или } \frac{p}{\rho} = RT, \quad (1.15)$$

где R — индивидуальная газовая постоянная, имеющая свое численное значение для каждого газа, Дж/(кг·К). Величина R численно равна работе, совершаемой 1 кг рабочего тела при его нагревании на 1 К при постоянном давлении.

Уравнение состояния для M (кг) идеального газа:

$$pV = MRT. \quad (1.16)$$

В современной метрологии и в международной системе единиц измерения в качестве единицы количества вещества используется понятие моля.

Моль — количество вещества N , содержащее столько структурных элементов (молекул, атомов, ионов), сколько их содержится в 12 г изотопа углерода C^{12} . 1 000 молей образуют *киломоля* (кмоль). Количество вещества определяется количеством N киломолей.

Молярная масса μ (кг/кмоль) — масса вещества, взятого в количестве одного киломоля:

$$\mu = \frac{M}{N}. \quad (1.17)$$

Молярный объем v_μ (м³/кмоль) — объем одного киломоля:

$$v_\mu = \frac{V}{N}. \quad (1.18)$$

Уравнение состояния для 1 кмоль газа

$$pv_\mu = R_\mu T, \quad (1.19)$$

где R_μ — универсальная газовая постоянная (постоянная величина для всех газов, которые можно считать идеальными), $R_\mu = 8\,314$ Дж/(кмоль·К). Величина R_μ численно равна работе, совершаемой 1 кмолем любого газа при его нагревании на 1 К при постоянном давлении.

Для N киломолей газа уравнение состояния соответственно имеет вид

$$pV = NR_\mu T. \quad (1.20)$$

Сравнивая уравнения (1.16) и (1.20), получаем

$$pV = NR_\mu T = MRT, \quad (1.21)$$

отсюда, учитывая, что $\frac{M}{N} = \mu$, находим

$$R_\mu = \mu R \text{ или } R = \frac{R_\mu}{\mu} = \frac{8\,314}{\mu}. \quad (1.22)$$

Примеры решения задач

Задача 1.1. Вакуумметр показывает разрежение $p_{\text{вак}} = 200$ мм рт. ст. Атмосферное давление $B_0 = 1\,020$ мбар. Определить абсолютное давление p в сосуде.

Решение.

$$p = p_6 - p_{\text{вак}}.$$

Приводим показания приборов к единым единицам измерения давления:

$$p_6 = B_0 \cdot 10^{-3} = 1\,020 \cdot 10^{-3} = 1,02 \text{ бар};$$

$$p_{\text{вак}} = 133,32 \cdot 10^{-5} \cdot 200 = 0,267 \text{ бар},$$

отсюда $p = 1,02 - 0,267 = 0,753$ бар.

Задача 1.2. Манометрическое давление в паровом котле составляет $p_{\text{ман1}} = 0,3$ кгс/см² при атмосферном давлении $B_{01} = 725$ мм рт. ст. Определить, чему будет равно манометрическое давление $p_{\text{ман2}}$, если атмосферное давление увеличится до $B_{02} = 785$ мм рт. ст.

Решение.

При начальном барометрическом давлении $p_1 = p_{61} + p_{\text{ман1}}$.

После повышения атмосферного давления $p_2 = p_{62} + p_{\text{ман2}}$.

При $p_1 = p_2$ $p_{61} + p_{\text{ман1}} = p_{62} + p_{\text{ман2}}$, откуда

$$p_{\text{ман2}} = p_{\text{ман1}} - (p_{61} - p_{62}).$$

С учетом перевода показаний приборов к единицам измерения в Па

$$p_{\text{ман2}} = 0,3 \cdot 9,81 \cdot 10^4 - (785 - 725) \cdot 133,32 = 21\,432 \text{ Па}.$$

Задача 1.3. В ртутных манометрах для предупреждения испарения ртути, пары которой оказывают вредное влияние на организм человека, над уровнем ртути в трубке, сообщаемой с атмосферой, наливают слой воды. Определить абсолютное давление в ресивере, если разность столбов ртути в U-образном манометре $h_0 = 600$ мм (более высокий уровень со стороны атмосферы), а высота столба воды над ртутью составляет 140 мм. Атмосферное давление, приведенное к 0 °С, 102 кПа. Определить погрешность результата измерения δ (%), если пренебречь влиянием защитного столба воды.

Решение.

Для нахождения абсолютного давления необходимо к давлению, определяемому разностью столбов ртути, прибавить давление, создаваемое столбом воды, и атмосферное давление. С учетом перевода показаний приборов к единицам измерения в МПа

$$p = h_{\text{рт}} \cdot 133,32 \cdot 10^{-6} + h_{\text{вод}} \cdot 9,81 \cdot 10^{-6} + p_6 \cdot 10^{-3} = 600 \cdot 133,32 \cdot 10^{-6} + 140 \cdot 9,81 \cdot 10^{-6} + 102 \cdot 10^{-3} = 0,183 \text{ МПа}.$$

Без защитного столба воды $p = 181,98 \cdot 10^{-3}$ МПа. Относительная погрешность $\delta = 0,8 \%$.

Задача 1.4. Для измерения малых давлений используют микроманометры (см. рис. 1.3). Определить абсолютное давление p в газопроводе, если длина столба жидкости в трубке микроманометра, наклоненной под углом $\varphi = 30^\circ$, $l = 200$ мм. В качестве рабочей жидкости используется спирт плотностью $\rho = 0,80$ кг/дм³. Ускорение свободного падения $g = 9,81$ м/с². Атмосферное давление $B_0 = 725$ мм рт. ст. Изменением уровня жидкости в рабочей камере пренебречь.

Решение.

Абсолютное давление в газопроводе рассчитывается как сумма атмосферного давления и избыточного (манометрического) давления, которое определяется по изменению уровня в наклонной измерительной трубке. Значение этого манометрического давления определяется произведением $l\rho g \sin \varphi$.

С учетом перехода к единицам измерения давления в барах

$$p = (p_6 + l\rho g \sin \varphi) = \\ = (725 \cdot 133,32 + 200 \cdot 0,80 \cdot 9,81 \cdot \sin 30) \cdot 10^{-5} = 0,974 \text{ бар.}$$

Задача 1.5. Танк преодолевает водную преграду по дну на глубине 5 м. Определить абсолютное давление в МПа на днище машины с клиренсом (расстоянием от грунта до днища) 0,4 м.

Решение.

$$p = p_6 + p_{\text{вод}}$$

С учетом перевода показания барометра и значения давления, создаваемого водой, к единицам измерения в МПа

$$p = 750 \cdot 133,32 \cdot 10^{-6} + (5 - 0,4) \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} = 0,145 \text{ МПа.}$$

Задача 1.6. Аэростат заполнен водородом на поверхности земли при атмосферном давлении $B_0 = 750$ мм рт. ст. и температуре $t_1 = 17^\circ\text{C}$. При этом его объем составлял $V_1 = 3\,000$ м³. Собственная масса аэростата $M_a = 800$ кг. Определить подъемную силу и объем аэростата на высоте $H = 3\,000$ м над уровнем моря.

Решение.

Подъемная сила воздушного шара определяется как разность силы тяжести массы воздуха в объеме, равном объему шара, и сил тяжести массы водорода в том же объеме и собственной массы шара.

Масса водорода в аэростате

$$M_{\text{H}_2} = \frac{p_1 V_1}{R_{\text{H}_2} T_1} = \frac{750 \cdot 133,32 \cdot 3\,000}{4\,157 \cdot 290} = 248,8 \text{ кг.}$$

Атмосферное давление на высоте 3 000 м

$$B_2 = B_0 \left(1 - \frac{H}{44\,300}\right)^{5,256} = 750 \cdot \left(1 - \frac{3\,000}{44\,300}\right)^{5,256} = 519 \text{ мм рт. ст.}$$

Температура воздуха на высоте 3 000 м

$$T_2 = T_0 - 0,0065H = 290 - 0,0065 \cdot 3\,000 = 270,5 \text{ К} = -2,5 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Объем аэростата на высоте 3 000 м

$$V_2 = \frac{M_{\text{H}_2} R_{\text{H}_2} T_2}{p_2} = \frac{248,8 \cdot 4\,157 \cdot 270,5}{519 \cdot 133,3} = 4\,043 \text{ м}^3.$$

Масса воздуха в объеме, равном объему аэростата,

$$M_{\text{в}} = \frac{p_2 V_2}{R_{\text{в}} T_2} = \frac{519 \cdot 133,32 \cdot 4\,043}{287 \cdot 270,5} = 3\,603,4 \text{ кг.}$$

Подъемная сила аэростата

$$P = (M_{\text{в}} - M_{\text{H}_2} - M_{\text{а}})g = (3\,603,4 - 248,8 - 800) \cdot 9,81 = 25\,061 \text{ Н.}$$

Задача 1.7. Температура воздуха в помещении размерами $L \times B \times H = 10 \times 5 \times 3$ м составляет $20 \text{ }^\circ\text{C}$ при давлении 750 мм рт. ст. Определить массу воздуха, находящегося в помещении, и на сколько она изменится при увеличении температуры в помещении до $27 \text{ }^\circ\text{C}$?

Решение.

Объем помещения

$$V = L \cdot B \cdot H = 10 \cdot 5 \cdot 3 = 150 \text{ м}^3.$$

Масса воздуха при исходных условиях

$$M_1 = \frac{Vp}{RT_1} = \frac{150 \cdot 750 \cdot 133,3}{287 \cdot 293} = 178,33 \text{ кг.}$$

Масса воздуха после повышения температуры

$$M_2 = \frac{Vp}{RT_2} = \frac{150 \cdot 750 \cdot 133,3}{287 \cdot 300} = 174,17 \text{ кг.}$$

Изменение массы воздуха в помещении

$$\Delta M = M_1 - M_2 = 178,33 - 174,17 = 4,16 \text{ кг.}$$

Задача 1.8. В баллоне вместимостью 200 л, предназначенном для газовой сварки, находится кислород при избыточном давлении 9 ати и температуре $27 \text{ }^\circ\text{C}$. После того, как часть кислорода была израсходована, давление в резервуаре понизилось до 3 ати, а температура уменьшилась до $17 \text{ }^\circ\text{C}$. Определить массу израсходованного кислорода. Атмосферное давление $B_0 = 735$ мм рт. ст.

Решение.

Молярная масса кислорода $\mu_{\text{O}_2} = 32$ кг/кмоль.

Газовая постоянная кислорода

$$R_{O_2} = \frac{R_{\mu}}{\mu_{O_2}} = \frac{8\,314}{32} = 259,8 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Значения абсолютного давления и температуры в исходном и конечном состояниях:

$$p_1 = p_{\text{ман}1} + p_6 = 9 \cdot 9,81 \cdot 10^4 + 735 \cdot 133,32 = 98,09 \cdot 10^4 \text{ Па};$$

$$p_2 = p_{\text{ман}2} + p_6 = 3 \cdot 9,81 \cdot 10^4 + 735 \cdot 133,32 = 39,23 \cdot 10^4 \text{ Па};$$

$$T_1 = 27 + 273 = 300 \text{ К}; \quad T_2 = 17 + 273 = 290 \text{ К}.$$

Изменение массы кислорода

$$\begin{aligned} \Delta M &= M_1 - M_2 = \frac{p_1 V}{R_{O_2} T_1} - \frac{p_2 V}{R_{O_2} T_2} = \frac{V}{R_{O_2}} \left(\frac{p_1}{T_1} - \frac{p_2}{T_2} \right) = \\ &= \frac{200 \cdot 10^{-3}}{259,8} \cdot \left(\frac{98,09}{300} - \frac{39,23}{290} \right) \cdot 10^4 = 1,476 \text{ кг}. \end{aligned}$$

Задача 1.9. В двигателях с искровым зажиганием топливо с помощью электромагнитной форсунки впрыскивается во впускной трубопровод через дозирующий элемент (рис. 1.4). При этом в подводящем топливопроводе поддерживается избыточное давление $p_{\text{ман}} = 300 \text{ кПа}$. Определить перепад давления на дозирующем элементе форсунки и абсолютное давление во впускном трубопроводе, если разрежение в нем $p_{\text{вак}} = 450 \text{ мм рт. ст.}$, а атмосферное давление $B_0 = 750 \text{ мм рт. ст.}$

Решение.

Перепад давления на дозирующем элементе форсунки равен разности абсолютных давлений топлива p_1 и абсолютного давления во впускном трубопроводе p_2 :

$$\Delta p = p_1 - p_2.$$

Однако

$$p_1 = p_{\text{ман}} + p_6, \text{ а } p_2 = p_6 - p_{\text{вак}}.$$

С учетом перевода давлений к единицам измерения в барах

$$\begin{aligned} \Delta p &= p_{\text{ман}} + p_{\text{вак}} = (300 + \\ &+ 450 \cdot 0,1333) \cdot 10^{-2} = 3,6 \text{ бар}. \end{aligned}$$

Абсолютное давление во впускном трубопроводе

$$\begin{aligned} p_2 &= p_6 - p_{\text{вак}} = (750 - 450) \cdot 133,32 \cdot 10^{-5} = \\ &= 0,4 \text{ бар}. \end{aligned}$$

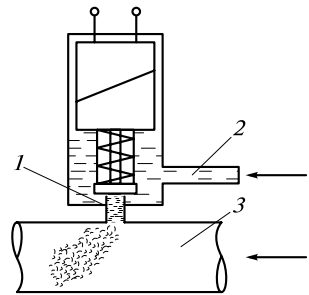


Рис. 1.4. Схема электромагнитной форсунки топливной системы:

1 — дозирующий элемент; 2 — топливопровод; 3 — впускной трубопровод

Задача 1.10. В некоторых бензиновых автомобильных двигателях, эксплуатируемых в настоящее время, дозирование топлива и его перемешивание с воздухом осуществляются в карбюраторе. В элементарном карбюраторе (рис. 1.5) топливо из поплавковой камеры 2 через топливный жиклер 1 и распылитель 3 поступает в диффузор 4 под действием создаваемого в нем разрежения. В поплавковой камере поддерживается постоянный уровень топлива $H = 20$ мм. Высота от устья распылителя до уровня топливного жиклера $h = 25$ мм. Плотность топлива $\rho = 0,76$ кг/дм³, ускорение свободного падения $g = 9,81$ м/с².

Определить:

а) перепад давления Δp_1 на топливном жиклере при разрежении над поверхностью топлива $p_{\text{вак}2} = 40$ мм вод. ст. и разрежении в диффузоре $p_{\text{вак}4} = 40$ мм рт. ст.;

б) минимальное разрежение $p_{\text{вак}4}$ в диффузоре, при котором начнется истечение топлива через топливный жиклер, в условиях, когда поплавковая камера сообщена с атмосферой.

Решение:

а) со стороны поплавковой камеры 2 на входе в жиклер 1 действует давление $(H\rho g + p_6 - p_{\text{вак}2})$, а на выходе из жиклера — $(h\rho g + p_6 - p_{\text{вак}4})$. Таким образом,

$$\Delta p_1 = (H\rho g + p_6 - p_{\text{вак}2}) - (h\rho g + p_6 - p_{\text{вак}4}) = p_{\text{вак}4} - p_{\text{вак}2} - (h - H)\rho g.$$

С учетом перевода давления к единицам измерения в мм рт. ст.

$$\begin{aligned} \Delta p_1 &= 40 - 40 \cdot 7,356 \cdot 10^{-2} - (25 - 20) \cdot 0,76 \cdot 9,81 \cdot 7,5 \cdot 10^{-3} = \\ &= 36,78 \text{ мм рт. ст.;} \end{aligned}$$

б) со стороны поплавковой камеры на входе в жиклер действует давление $p_6 + H\rho g$, со стороны диффузора — $h\rho g + p_{\text{абс}4} = h\rho g + p_6 - p_{\text{вак}4}$.

Истечение топлива начнется в момент, когда давление со стороны поплавковой камеры станет больше, чем со стороны диффузора. С учетом приведения значений давления к единой размерности

$$p_{\text{вак}4} = (h - H)\rho g = (25 - 20) \cdot 0,76 \cdot 9,81 \cdot 7,5 \cdot 10^{-3} = 0,28 \text{ мм рт. ст.}$$

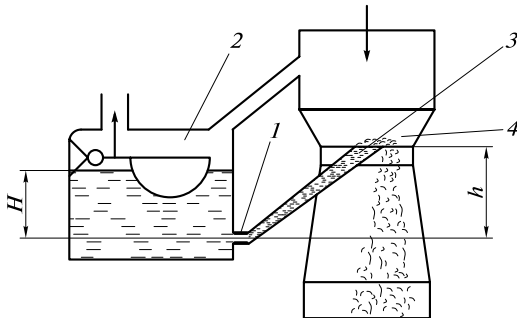


Рис. 1.5. Схема элементарного карбюратора:

1 — топливный жиклер; 2 — поплавковая камера; 3 — распылитель; 4 — диффузор

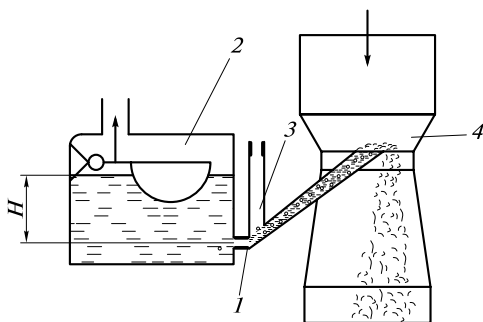


Рис. 1.6. Схема эмульсионного карбюратора:

1 — топливный жиклер; 2 — поплавковая камера; 3 — эмульсионный колодец; 4 — диффузор

Задача 1.11. В карбюраторных двигателях для обеспечения необходимого соотношения воздуха и топлива в горючей смеси применяют эмульсионный карбюратор (рис. 1.6), отличающийся от элементарного наличием эмульсионного колодца 3 с воздушным жиклером. Топливо из поплавковой камеры 2 через топливный жиклер, эмульсионный колодец 3 и распылитель поступает в диффузор 4 под действием создаваемого в нем разрежения. При этом в поплавковой камере поддерживается постоянный уровень топлива $H = 20$ мм; разрежение над поверхностью топлива $p_{\text{вак}2} = 40$ мм вод. ст. Величина разрежения у топливного жиклера со стороны эмульсионного колодца $p_{\text{вак}3} = 40$ мм рт. ст. Плотность топлива $\rho = 0,76$ кг/дм³, ускорение свободного падения $g = 9,81$ м/с². Определить перепад давления Δp_1 на топливном жиклере 1.

Решение.

Перепад давления на топливном жиклере определяется разностью абсолютных давлений, действующих на топливо со стороны поплавковой камеры и со стороны эмульсионного колодца.

С учетом перехода к единицам измерения в мм рт. ст.

$$\begin{aligned} \Delta p_1 &= p_2 - p_3 = (p_6 - p_{\text{вак}2} + H\rho g) - (p_6 - p_{\text{вак}3}) = p_{\text{вак}3} - p_{\text{вак}2} + H\rho g = \\ &= 40 - 40 \cdot 7,356 \cdot 10^{-2} + 20 \cdot 0,76 \cdot 9,81 \cdot 7,5 \cdot 10^{-3} = 38,18 \text{ мм рт. ст.} \end{aligned}$$

Задача 1.12. На автомобилях с двигателями, работающими на природном газе, для хранения газа устанавливают баллоны высокого давления. В баллоне объемом 200 л находится метан (СН₄) под давлением 20 ати при температуре 27 °С. После некоторого пробега автомобиля часть метана была израсходована, давление в баллоне понизилось до 12 ати, а температура уменьшилась до 17 °С. Определить массу израсходованного метана. Атмосферное давление принять равным 735 мм рт. ст.