

А.О. Мирам В.А. Павленко

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

ТЕПЛОМАССОБМЕН

$$q = -\lambda \operatorname{grad} t$$

$$ds \geq \frac{dq}{T}$$

А.О. Мирам, В.А. Павленко

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

ТЕПЛОМАССОБМЕН

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов РФ
по образованию в области строительства в качестве учебника
для студентов, обучающихся по направлению
270100 «Строительство»*



Издательство Ассоциации строительных вузов
Москва
2011

Рецензенты:

заведующий кафедрой ТГС ННГАСУ, доктор технических наук,
профессор *А.Г. Кочев*; доктор технических наук, профессор Белорусского
политехнического университета *П.И. Дячек*.

Мирам А.О., Павленко В.А.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА. ТЕПЛОМАССОБМЕН:
Учебное издание. – М.: Издательство АСВ, 2011. – 352 с.

ISBN 978-5-93093-841-8

В данном учебнике рассмотрены первый и второй законы термодинамики, процессы изменения состояния идеальных газов; вопросы по термодинамике потока, тепловым двигателям, холодильным машинам. Представлены материалы по реальным газам – водяному пару и влажному воздуху, элементы химической термодинамики (кратко). Изложены исследования процессов в реальных газах. Также проанализированы вопросы теплопроводности, конвективного теплообмена и теплового излучения. Рассмотрены положения теории подобия и нестационарной теплопроводности. Приведены разделы по расчету теплообменных аппаратов различного типа.

ISBN 978-5-93093-841-8

© Издательство АСВ, 2011

© Мирам А.О., Павленко В.А., 2011

Оглавление

Предисловие	9
Раздел I. ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА	11
Глава 1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ	11
§1.1. Предмет термодинамики. Термодинамическая система.....	11
§1.2. Основные параметры состояния газов	13
§1.3. Уравнение состояния газов	15
§1.4. Смеси идеальных газов.....	17
§1.5. Теплоемкость идеальных газов.....	21
Глава 2. ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ	23
§2.1. Внутренняя энергия газа	23
§2.2. Работа газа при его расширении.....	24
§2.3. Аналитическое выражение первого закона термодинамики	25
§2.4. Уравнение первого закона термодинамики для газового потока. Энтальпия газа	27
§2.5. Энтропия идеального газа	30
Глава 3. ПРОЦЕССЫ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ	32
§3.1. Частные процессы изменения состояния газов..	32
§3.2. Политропный процесс изменения состояния газов.....	39
§3.3. Группы политропных процессов	43
Глава 4. ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ	49
§4.1. Основные положения второго закона термодинамики	49
§4.2. Цикл Карно	52
§4.3. Интеграл Клаузиуса. Аналитическое выражение второго закона термодинамики	55
§4.4. Эксергия теплоты. Физический смысл энтропии	58
Глава 5. ВОДЯНОЙ ПАР.....	61
§5.1. Свойства реальных газов.....	61
§5.2. Водяной пар.....	63
§5.3. Процесс парообразования в p - v -диаграмме	64

§5.4. Параметры состояния водяного пара	64
§5.5. Исследование процессов парообразования с помощью Ts - и iS -диаграмм	72
§5.6. Процессы изменения состояния водяного пара	75
Глава 6. ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ.....	79
§6.1. Характеристики влажного воздуха.....	79
§6.2. Id -диаграмма для влажного воздуха и ее построение	83
§6.3. Процессы изменения состояния влажного воздуха.....	85
Глава 7. ПРОЦЕССЫ ИСТЕЧЕНИЯ И ДРОССЕЛИРОВАНИЯ ПАРОВ И ГАЗОВ.....	89
§7.1. Работа, скорость и расход газа в процессе истечения	89
§7.2. Истечение пара или газа через комбинированное сопло (сопло Лавалья)	98
§7.3. Действительный процесс истечения паров и газов.....	100
§7.4. Дросселирование паров и газов	102
Глава 8. КОМПРЕССОРЫ.....	106
§8.1. Общие положения	106
§8.2. Одноступенчатый поршневой компрессор.....	106
§8.3. Многоступенчатый поршневой компрессор	112
Глава 9. ЦИКЛЫ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ.....	116
§9.1. Общие положения	116
§9.2. Цикл ДВС с подводом теплоты по изохоре (цикл Отто).....	116
§9.3. Цикл ДВС с подводом теплоты по изобаре (цикл Дизеля)	119
Глава 10. ЦИКЛЫ ПАРОСИЛОВЫХ УСТАНОВОК.....	123
§10.1. Общие положения	123
§10.2. Цикл Ренкина.....	125
§10.3. Энергетические показатели и потери паротурбинных установок.....	128
§10.4. Влияние параметров пара на термический КПД цикла Ренкина	130

§10.5. Промежуточный перегрев пара	131
§10.6. Теплофикационные циклы	134
Глава 11. ЦИКЛЫ ГАЗОТУРБИНЫХ УСТАНОВОК	137
Глава 12. ЦИКЛ ПАРОВАЗОВОЙ УСТАНОВКИ	140
Глава 13. ЦИКЛЫ АТОМНЫХ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК	143
Глава 14. ЦИКЛЫ ХОЛОДИЛЬНЫХ УСТАНОВОК	145
§14.1. Основные характеристики холодильного цикла	145
§14.2. Воздушная холодильная установка	148
§14.3. Паровая компрессорная холодильная установка	150
§14.4. Абсорбционные холодильные установки.....	152
§14.5. Цикл теплового насоса	155
Глава 15. ЭЛЕМЕНТЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ	158
§15.1. Первый закон термодинамики и химические процессы.....	158
§15.2. Второй закон термодинамики в применении к химическим реакциям. Третий закон термодинамики.....	164
Глава 16. ЦИКЛЫ РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ.....	182
Глава 17. ЦИКЛЫ ПРЯМОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ	185
Раздел II. ТЕПЛОМАССОБМЕН	186
Введение.....	186
Глава 1. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ.....	187
§1.1. Температурное поле.....	187
§1.2. Градиент температуры.....	187
§1.3. Закон Фурье	188
§1.4. Теплопроводность	189

§1.5. Дифференциальное уравнение теплопроводности.....	190
§1.6. Условия однозначности.....	192

**Глава 2. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ
ПРИ СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ
И ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ПЕРВОГО РОДА....194**

§2.1. Теплопроводность через однослойную плоскую стенку.....	194
§2.2. Теплопроводность через многослойную плоскую стенку.....	197
§2.3. Теплопроводность через однослойную цилиндрическую стенку	199
§2.4. Теплопроводность через многослойную цилиндрическую стенку	201
§2.5. Упрощенная формула для расчета теплопроводности цилиндрических стенок.....	203
§2.6. Теплопроводность шаровой стенки	204
§2.7. Теплопроводность тел неправильной формы.....	205
§2.8. Теплопроводность с внутренними источниками теплоты	206

**Глава 3. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПРИ СТАЦИОНАР-
НОМ РЕЖИМЕ И ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ
ТРЕТЬЕГО РОДА (ТЕПЛОПЕРЕДАЧА).....209**

§3.1. Теплопередача, коэффициент теплопередачи	209
§3.2. Теплопередача через стенки при граничных условиях третьего рода и стационарном режиме	209
§3.3. Критический диаметр цилиндрической стенки	220

Глава 4. КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН223

§4.1. Общие понятия и основные теории конвективного теплообмена	223
§4.2. Дифференциальные уравнения конвективного теплообмена	228
§4.3. Основы теории подобия	234
§4.4. Приведение дифференциальных уравнений конвективного теплообмена и условий однозначности к безразмерному виду	237
§4.5. Уравнения подобия	243

§4.6. Средняя температура. Определяющая температура. Эквивалентный диаметр	244
§4.7. Обобщение опытных данных на основе теории подобия	246
Глава 5. ТЕПЛООБМЕН В ЖИДКОСТЯХ И ГАЗАХ.....	248
§5.1. Теплоотдача при течении жидкости в каналах ..	248
Глава 6. ТЕПЛООТДАЧА ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ПОПЕРЕЧНОМ ОМЫВАНИИ ТРУБЫ И ПУЧКА ТРУБ.....	255
§6.1. Теплоотдача при поперечном омывании одиночной трубы	255
§6.2. Теплоотдача при поперечном омывании пучков труб.....	257
Глава 7. ТЕПЛООТДАЧА ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ДВИЖЕНИИ ЖИДКОСТИ ВДОЛЬ ПЛАСТИНЫ	263
7.1. Критериальные уравнения для определения средних коэффициентов теплоотдачи при обтекании плоской пластины.....	264
Глава 8. ТЕПЛООТДАЧА ПРИ СВОБОДНОМ ДВИЖЕНИИ ЖИДКОСТИ.....	266
§8.1. Теплоотдача при свободном движении жидкости в неограниченном пространстве вдоль вертикальных поверхностей и около горизонтальных поверхностей	266
§8.2. Теплоотдача при свободном движении жидкости в ограниченном пространстве	269
Глава 9. ТЕПЛООТДАЧА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ АГРЕГАТНОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА	272
§9.1. Теплообмен при кипении	272
§9.2. Теплообмен при конденсации пара.....	277
Глава 10. ТЕПЛООБМЕН ИЗЛУЧЕНИЕМ.....	284
§10.1. Общие положения	284
§10.2. Основные законы теплового излучения.....	287
§10.3. Теплообмен излучением между телами.....	292

§10.4. Использование экранов для защиты от излучения	296
§10.5. Излучение паров и газов	298
§10.6. Сложный теплообмен	305
Глава 11. ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ	306
§11.1. Общие положения	306
§11.2. Основы теплового расчета рекуперативных теплообменных аппаратов	307
§11.3. Вычисление коэффициента теплопередачи	309
§11.4. Определение среднего температурного напора	311
§11.5. Определение конечных температур теплоносителей	317
§11.6. Особенности теплового расчета регенера- тивных теплообменных аппаратов	320
§11.7. Особенности теплового расчета смесительных теплообменников	323
Глава 12. НЕСТАЦИОНАРНАЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ	325
§12.1. Основные положения	325
§12.2. Нагревание и охлаждение плоской стенки	328
§12.3. Нагревание и охлаждение цилиндра бесконечной длины	331
§12.4. Нагревание и охлаждение шара	333
§12.5. Зависимость распространения теплоты от формы и размеров тела	335
§12.6. Приближенные методы решения задач нестационарной теплопроводности	336
Глава 13. ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС	341
§13.1. Основные закономерности	341
§13.2. Дифференциальные уравнения тепло- и массообмена	343
§13.3. Аналогия процессов теплообмена и массо- обмена. Диффузионные числа подобия	344
§13.4. Совместный процесс тепло- и массопереноса при испарении жидкости	346
Приложение	348
Список литературы	350

ПРЕДИСЛОВИЕ

Для снабжения тепловой энергией и поддержания требуемых параметров микроклимата в самых разнообразных зданиях и сооружениях затрачивается более трети всех используемых в стране топливно-энергетических ресурсов. Поэтому обеспечение рационального теплового режима зданий и оптимальное использование теплоты в системах отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха является крайне актуальной проблемой в современном обществе. Важным вопросом является оптимальная организация работы агрегатов и устройств, в которых сжигается топливо различного вида для получения разнообразных теплоносителей. Эффективное и экономичное функционирование теплогенерирующих установок, экономичная работа систем тепло- и газоснабжения также занимают важнейшее место в теплотехническом комплексе.

Дисциплины «Техническая термодинамика» и «Тепломассообмен», представляющие собой теоретические основы теплотехнических дисциплин, занимают особое место в подготовке специалистов по направлению «Теплогазоснабжение и вентиляция». Глубокое усвоение профилирующих дисциплин специальности – строительной теплофизики, отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха, холодо- и теплоснабжения, теплогенерирующих (котельных) установок, газоснабжения и других – базируется на фундаменте теоретических (общетехнических) дисциплин, среди которых ведущее место принадлежит прикладной термодинамике, тепломассообмену. В условиях интенсивного развития экономики, модернизации промышленности и иных отраслей экономики, использования в хозяйстве новых методов, направленных на экономию топливно-энергетических и материальных ресурсов, роль фундаментальных наук особенно велика. Успешное и быстрое решение инженером конкретных задач в большой степени обусловлено его умением творчески применять знания из области фундаментальных наук.

При изложении материала данного учебника особое внимание обращалось на освещение физической сущности явлений и процессов, логическое обоснование рассматриваемых положений, использование математических методов с целью обеспечения ясности и краткости повествования. Авторы по возможности старались вначале сформулировать отдельные проблемы, а затем показать процесс их решения, выводя его из основных законов и уравнений. Такой подход способствует творческому усвоению материала, с одной

стороны, и привитию навыков научно-исследовательской работы – с другой.

Содержание двух разделов книги формировалось в течение многих лет преподавания дисциплин «Техническая термодинамика» и «Тепломассообмен» в МГСУ (МИСИ) на факультете ТГВ и полностью соответствует программам этих дисциплин для направления Теплогазоснабжение и вентиляция.

Часть учебника «Техническая термодинамика» написана профессором, к.т.н. В.А. Павленко. Раздел «Тепломассообмен» – профессором, к.т.н. А.О. Мираном.

Авторы приносят глубокую благодарность коллективам кафедры «Теплотехника и котельные установки» Московского государственного строительного университета и кафедры «Теплогазоснабжение» Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета и лично заведующему этой кафедрой – профессору, д.т.н. А.Г. Кочеву, за полезные советы и замечания, сделанные при рецензировании рукописи.

Раздел I.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

Глава 1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

§1.1. Предмет термодинамики. Термодинамическая система

Термодинамика – наука о свойствах энергии, ее различных видах, а также о закономерностях перехода энергии от одних тел к другим и из одного вида в другой. Основой этой науки являются два закона природы, установленные экспериментально и называемые первым и вторым началами термодинамики. Первый из них является приложением к тепловым явлениям и процессам всеобщего закона сохранения и превращения энергии. Второй закон характеризует условия возникновения и направление развития энергетических процессов, протекающих в окружающей нас природе.

Исторически термодинамика сложилась в процессе изучения вопросов, связанных с работой тепловых двигателей, т. е. устройств, в которых за счет теплоты, выделившейся при сгорании топлива, получается механическая энергия. В настоящее время создан термодинамический метод исследования любых макроскопических процессов, в которых так или иначе проявляются свойства энергии.

Техническая термодинамика изучает процессы взаимного превращения теплоты и работы и применение к этим процессам законов термодинамики. Каждый реальный процесс может быть рассмотрен упрощенно, схематизировано для проведения его полного термодинамического анализа. Такая схематизация заключается в том, что из комплекса всех участвующих в процессе тел выделяется *рабочее тело*, с помощью которого осуществляется данный процесс, а остальные окружающие тела рассматриваются как источники (и поглотители) теплоты. Такая совокупность тел, находящихся в энергетическом взаимодействии с внешней средой, называется *термодинамической системой*. Если термодинамическая система не может отдавать энергию в какой бы то ни было форме вовне и не

может получать ее извне, то она называется *изолированной*. Система может быть *термически изолированной*, когда обмен теплотой с внешней средой отсутствует, но система при этом способна совершать работу или быть объектом внешней работы. *Механически изолированная* термодинамическая система способна только к взаимному теплообмену с окружающими телами.

Любое тело обладает запасом энергии, которая в общем случае состоит из *внешней* энергии, присущей всему телу в целом, и *внутренней* энергии, определяемой энергией молекул, из которых состоит тело.

Внешняя энергия обусловлена видимым движением тела и наличием силового поля земного тяготения. Внешняя кинетическая энергия зависит от скорости видимого движения. Внешняя потенциальная энергия определяется высотой центра тяжести тела над заданным уровнем.

Внутренняя энергия определяется невидимым движением молекул тела и силами взаимодействия между ними. Иногда внутреннюю энергию называют тепловой. Но такое определение возможно только при анализе процессов, в которых не протекают ни химические, ни ядерные реакции.

Передача энергии между телами возможна двумя принципиально разными способами. Когда одно тело производит на другое силовое воздействие в процессе видимого движения, тогда совершается *механическая работа*, измеряемая произведением силы на путь. У тела, совершающего работу, запас энергии убывает, а у тела, над которым совершается работа, запас энергии увеличивается. В таком случае работа, переходящую от одного тела к другому, определяет энергию, переданную макрофизическим путем.

Если между телами существует разность температур, то энергия переходит от более нагретого тела непосредственно к менее нагретому без совершения механической работы. И это есть второй способ передачи энергии, которая в этом случае называется *теплотой*, а сам способ передачи энергии – *теплообменом*. У более нагретого тела при теплообмене тепловая энергия уменьшается, а у менее нагретого – увеличивается.

Теплообмен – это микрофизическая форма энергопереноса, и при этом изменяется только внутренняя молекулярная энергия тел.

В общем случае обмен энергией между телами реализуется сразу двумя способами, т. е. в одном и том же процессе имеют место одновременно и совершение работы, и перенос теплоты.

Для определения полезной работы процесса и количества переданной теплоты, что составляет главное содержание прикладной части термодинамики, необязательно знать все особенности кинетики реального процесса. Вполне достаточно, чтобы наряду с внешними условиями, в которых протекает процесс, были известны лишь начальные и конечные состояния всех участвующих в процессе тел. При этом для лучшего понимания физического смысла изучаемых процессов термодинамический метод анализа обычно сочетается с молекулярными и статическими исследованиями.

§1.2. Основные параметры состояния газов

В тепловых двигателях процесс преобразования теплоты в работу осуществляется с помощью рабочего тела. В качестве рабочего тела используются газы и пары, так как они обладают высоким коэффициентом теплового расширения и могут при нагревании совершать значительно большую работу, чем жидкости и твердые тела.

При теоретическом изучении газообразных тел (газов) вводится понятие «идеальный газ», между молекулами которого отсутствуют силы взаимодействия, а сами молекулы принимаются за материальные точки, не имеющие объема.

В природе не существует идеальных газов, но часто встречаются такие состояния реально существующих газов, у которых силы взаимодействия между молекулами и объемы самих молекул чрезвычайно малы.

В теплотехнических расчетах допустимо считать идеальными все газы, с какими приходится иметь дело в теплотехнике (N_2 , O_2 , H_2 , CO_2 и т. д.). А вот водяной пар (H_2O) встречается в различных состояниях. Если водяной пар является частью газовых смесей, которые получаются в результате сгорания топлива в различных агрегатах, то в этом случае парциальное давление пара мало, а температура пара высокая и он далек от состояния жидкости. Такой водяной пар можно считать идеальным газом. Идеальным газом обычно считают и водяной пар, который находится в атмосферном воздухе как составная его часть.

Когда же водяной пар является рабочим телом в тепловых двигателях или теплоносителем в различных теплообменных аппаратах, пренебрегать силами сцепления между молекулами и объемом

самих молекул нельзя, так как его состояние близко к состоянию жидкости. Такой газ уже не подчиняется законам идеальных газов.

Один и тот же газ может находиться в различных состояниях. Каждое из таких состояний газа определяют некоторые средние величины. Эти величины имеют строго определенное значение, и они носят название «*термодинамические параметры*». Основными параметрами состояния газов являются *температура, давление и удельный объем*, которые часто именуют *термическими*.

Известно, что под температурой газа понимают меру средней кинетической энергии хаотического движения его молекул. Наиболее распространены две температурные шкалы: термодинамическая и международная практическая. Температура по каждой из этих шкал может быть выражена двояким способом в зависимости от начала отсчета: в градусах абсолютной шкалы T (К) и в градусах стоградусной шкалы t ($^{\circ}\text{C}$), которая часто называется шкалой Цельсия. Термодинамическая температурная шкала имеет одну постоянную точку, *которая получена опытным путем*. Это – температура тройной точки воды, которая имеет значение 273,16 К, или 0,01 $^{\circ}\text{C}$. Второй постоянной точкой является абсолютный нуль температур. Соотношение между T и t определяется так

$$T - t = 273,16 - 0,01 = 273,15$$

$$\text{и } T = t + 273,15.$$

Удельный объем v как параметр состояния, представляет собой объем 1 кг массы газа, выраженный в кубических метрах. Величина, обратная удельному объему, называется плотностью ρ . Плотность представляет собой выраженную в килограммах массу 1 м³ газа. Понятно, что произведение $v\rho = 1$.

Давление p – третий параметр состояния газа. Под давлением газа на стенки сосуда, в котором заключен газ, понимают средний результат ударов о стенки громадного числа молекул, из которых состоит газ. В Международной системе единиц измерения *SI* давление измеряется единицей Н/м², которая называется «паскаль» (Па). Поскольку в технике приходится встречаться с большими величинами давлений, то для их измерения пользуются единицами: бар (10⁵ Па), кПа (10³ Па), МПа (10⁶ Па).

Если абсолютное давление газа в сосуде больше атмосферного, то разность между ними называется *избыточным* давлением. Если же абсолютное давление газа в сосуде меньше атмосферного, то разность между ними называется *разрежением*, или *вакуумом*.

Физическая атмосфера как единица измерения давления иногда используется в физике. Это давление на основании ртутного столба высотой 760 мм при 0°C и нормальном ускорении свободного падения $9,81 \text{ м/с}^2$. Эта единица измерения давления входит в определение так называемых нормальных физических условий (НФУ), к которым приводят состояния различных газов при необходимости сравнения их между собой по объему. Нормальными физическими или просто нормальными условиями называются такие, при которых $p = 1$ физ. атм. и $t = 0^\circ\text{C}$. Так как $1 \text{ бар} = 750 \text{ мм ст. Hg}$, то $1 \text{ физ. ат.} = 760/750 = 1,013 \text{ бар}$.

§1.3. Уравнение состояния газов

Идеализация основных свойств тела приводит к представлению об идеальном газе, о чем говорилось выше. Молекулярно-кинетическая теория газов позволяет получить теоретически выражение, называемое основным уравнением кинетической теории газов:

$$p = \frac{2}{3} n \frac{mw^2}{2}, \quad (1.1)$$

где n – число молекул, заключенных в единице объема; m – масса молекулы; w – средняя квадратичная скорость молекул.

Уравнение (1.1) является основным при выводе зависимости между термическими параметрами идеального газа в любом его состоянии:

$$pv = RT. \quad (1.2)$$

Это выражение представляет собой *термическое уравнение состояния идеального газа*. Его часто называют *уравнением Клапейрона*.

Параметр R от состояния газа не зависит и поэтому называется *газовой постоянной*. В уравнении (1.2) величина газовой постоянной R для каждого газа с молекулярной массой μ будет иметь свое вполне определенное значение и вычисляться так:

$$R = 8314/\mu, \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Уравнение состояния для произвольного количества идеального газа M выглядит так:

$$\rho V = MRT.$$

Эти уравнения иначе называются также *характеристическими (термическими) уравнениями* состояния газа. С помощью этих уравнений для любого состояния газа по двум известным его параметрам можно найти третий.

Значит, у идеального газа произвольно можно изменять только два параметра его состояния, а третий параметр получится из уравнений состояния в соответствии с заданными двумя степенями свободы изменения параметров своего состояния.

Характеристические уравнения описывают *равновесное* состояние газа, т. е. такое, при котором давление, температура и плотность в каждый момент времени будут одинаковы во всей массе рассматриваемого газа. Если газ переходит из состояния, характеризуемого параметрами p_1 , v_1 и T_1 , в другое с параметрами p_2 , v_2 и T_2 и это происходит так, что в каждый отдельный момент газ находится в равновесном состоянии, то такой процесс является *равновесным*.

Если в процессе изменения состояния газ находится при постоянном давлении, получаем:

$$\frac{v}{T} = const \quad \frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2} .$$

То есть при постоянном давлении объем газа изменяется прямо пропорционально его абсолютной температуре. Это положение называется *законом Гей-Люссака*.

Рассматривая газ при постоянном объеме, получаем, что

$$pT = const \quad \frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} .$$

Эта закономерность именуется *законом Шарля*.

Наконец, рассматривая газ при постоянной температуре, получаем

$$pv = const \quad p_1 v_1 = p_2 v_2 .$$

Последнее уравнение представляет собой математическое написание известного *закона Бойля – Мариотта*.

Доказано, что разные газы, находящиеся при одинаковых давлениях и температурах и занимающие одинаковые объемы, содержат одинаковое число молекул. Это положение составляет содержание *закона Авогадро*.

Из закона Авогадро следует, что плотности газов при одинаковых давлениях и температурах пропорциональны их молекулярным массам μ , т. е. $\mu_1/\rho_1 = \mu_2/\rho_2$ или $\mu_1\nu_1 = \mu_2\nu_2$ и $\mu\nu = \text{idem}$.

Произведение $\mu\nu$ есть объем 1 моля газа, поэтому закон Авогадро можно сформулировать и таким образом: объем 1 моля различных газов при одинаковых физических условиях одинаков. Например, при нормальных физических условиях (НФУ) для кислорода $\mu\nu = \mu/\rho = 32/1,43 = 22,4 \text{ м}^3$. Тогда при НФУ объем 1 киломоля всех газов будет равен $22,4 \text{ м}^3$. Отсюда следует, что

$$\rho = \mu/22,4.$$

Это равенство позволяет рассчитать плотности различных газов при нормальных физических условиях.

§1.4. Смеси идеальных газов

Если несколько газов, не взаимодействующих химически, поместить в общий сосуд, то благодаря хаотическому движению молекул и процессам диффузии каждый из них равномерно распределится по объему сосуда и создастся газовая смесь.

Аналогичные смеси образуются при горении различных видов топлив.

Рассматривая смеси газов, будем исходить из того, что смесь идеальных газов, не вступающих в химическое взаимодействие друг с другом, также является идеальным газом и подчиняется таким же законам

При этом каждый газ, входящий в состав газовой смеси, ведет себя так, как будто он один при данной температуре занимает весь объем смеси. Давление, которое при этом оказывает каждый компонент смеси на стенки сосуда, называется *парциальным*, а давление газовой смеси складывается из парциальных давлений газов, образующих газовую смесь. Это положение и определяет содержание *закона Дальтона*, который математически записывается следующим образом:

$$p_{см} = \sum_{i=1}^{i=n} p_i, \quad (1.3)$$

где $p_{см}$ – давление смеси газов; p_i – парциальное давление i -го компонента, входящего в состав смеси; n – число компонентов, образующих смесь.

Учебное издание

**Андрей Олегович Мирам
Владимир Александрович Павленко**

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

ТЕПЛОМАССОБМЕН

Редактор: *В.Ш. Мерзлякова*
Компьютерный дизайн обложки: *Н.С. Романова*
Компьютерная верстка: *Е.М. Лютова*
Компьютерная графика: *М. Родионова*

Лицензия ЛР № 0716188 от 01.04.98. Формат 60х90/16.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.

Усл. 22 п.л. Тираж 1000 экз. Заказ №

Издательство АСВ
129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, отдел реализации – оф. 511
тел., факс: (499)183-56-83, e-mail: iasv@mgsu.ru, <http://www.iasv.ru/>