

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	8
ЧАСТЬ ПЕРВАЯ. ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА.....	9
Глава 1. Основные исходные положения термодинамики	10
1.1. Основные понятия.....	10
1.2. Термические параметры состояния термодинамической системы	10
1.3. Уравнение состояния идеального газа.....	13
1.4. Термодинамический процесс	14
1.5. Теплоемкость газов	16
Глава 2. Первый закон термодинамики	18
2.1. Внутренняя энергия	18
2.2. Работа изменения объема в закрытой термодинамической системе.....	18
2.3. Теплота	20
2.4. Математическое выражение первого закона термодинамики.....	20
2.5. Энтальпия.....	21
Глава 3. Второй закон термодинамики	22
3.1. Энтропия. Тепловая диаграмма в T, s -координатах	22
3.2. Необратимость тепловых процессов.....	23
3.3. Формулировки второго закона термодинамики	24
3.4. Прямой и обратный обратимые циклы Карно	25
Глава 4. Основные термодинамические процессы идеального газа	28
Глава 5. Процессы течения газов и жидкостей	31
5.1. Уравнение неразрывности потока	31
5.2. Режимы движения жидкости и газа	31
5.3. Уравнение первого закона термодинамики для потока	32
5.4. Применение первого закона термодинамики для газовых потоков	34
5.5. Уравнение Бернулли	35
Глава 6. Смеси идеальных газов.....	39
Глава 7. Вода и водяной пар.....	41
Глава 8. Свойства сухого и влажного воздуха	48
8.1. Атмосферный воздух	48
8.2. Физические свойства сухого воздуха.....	48
8.3. Физические свойства влажного воздуха.....	49
8.4. Определение параметров влажного воздуха с помощью h, d -диаграммы	54
ЧАСТЬ ВТОРАЯ. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ТЕПЛООБМЕНА	61
Глава 9. Основные понятия и определения	62
Глава 10. Теплопроводность	64
10.1. Основной закон теплопроводности.....	64

10.2. Коэффициент теплопроводности.....	65
10.3. Перенос теплоты теплопроводностью при стационарном режиме	66
Глава 11. Конвективный теплообмен (теплоотдача).....	71
11.1. Основной закон конвективного теплообмена.....	71
11.2. Расчетные зависимости для определения коэффициентов теплоотдачи.....	72
Глава 12. Лучистый теплообмен.....	79
12.1. Общие понятия и определения.....	79
12.2. Основные законы теплового излучения.....	80
12.3. Теплообмен излучением системы тел в прозрачной среде.....	82
Глава 13. Теплопередача.....	87
13.1. Сложный теплообмен.....	87
13.2. Теплопередача между двумя жидкостями или газами через разделяющую их стенку.....	88
13.3. Оребрение как средство интенсификации теплопередачи.....	89
Глава 14. Теплообменные аппараты.....	92
14.1. Классификация теплообменных аппаратов.....	92
14.2. Расчетные уравнения.....	98
14.3. Виды теплового расчета теплообменных аппаратов.....	100
14.4. Применение теплообменных аппаратов в пищевой промышленности.....	104
14.5. Сравнение пластинчатых и кожухотрубных теплообменных аппаратов.....	105
ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ. ТЕПЛОСИЛОВЫЕ УСТАНОВКИ И АППАРАТЫ	
В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ.....	109
Глава 15. Энергетическое топливо и его виды.....	110
15.1. Общие характеристики топлив.....	110
15.2. Характеристики видов топлив.....	113
Глава 16. Котельные установки.....	121
16.1. Основные определения.....	121
16.2. Тепловой баланс парового котла. Коэффициент полезного действия.....	122
16.3. Газотрубные котлы.....	127
16.4. Водотрубные котлы.....	133
Глава 17. Водный режим котлов.....	145
17.1. Загрязнения воды и требования к качеству питательной воды котлов.....	145
17.2. Водоподготовка добавочной воды.....	146
17.3. Термическая деаэрация питательной воды.....	147
17.4. Коррозия поверхностей нагрева котла.....	148
Глава 18. Сушка сельскохозяйственной продукции.....	151
18.1. Влага в продуктах сельхозпроизводства.....	151
18.2. Влажность твердых материалов.....	151
18.3. Формы связи влаги с материалом.....	152

18.4. Равновесие фаз при сушке.....	153
18.5. Кинетика сушки влажных материалов	155
18.6. Материальный и тепловой баланс сушки.....	158
18.7. Конструкции сушилок	159
Глава 19. Двигатели внутреннего сгорания.....	168
19.1. Общие сведения и классификация двигателей внутреннего сгорания	168
19.2. Циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания.....	173
19.3. Техничко-экономические показатели двигателей внутреннего сгорания	176
19.4. Тепловой баланс двигателя	178
19.5. Топлива, применяемые в двигателях внутреннего сгорания	181
19.6. Смесеобразование в бензиновых и дизельных ДВС	185
19.7. Газовые двигатели внутреннего сгорания.....	188
19.8. Токсичность выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания...	192
19.9. Перспективы использования двигателей на газомоторном топливе	193
19.10. Стационарные ГДВС в системе когенерации	195
19.11. Электромобили.....	196
Глава 20. Холодильные установки	204
Глава 21. Тепловые насосы	209
ЧАСТЬ ЧЕТВЕРТАЯ. СТРОИТЕЛЬНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА.....	215
Глава 22. Использование тепловой энергии в зданиях и сооружениях.....	216
22.1. Потери тепловой энергии в зданиях сооружений.....	216
22.2. Климатические условия, влияющие на конструкцию зданий при их проектировании.....	218
22.3. Теплопроводность и термическое сопротивление ограждающих конструкций.....	220
22.4. Диффузионный перенос влаги.....	221
22.5. Воздухопроницание через ограждающие конструкции.....	227
22.6. Теплоизоляционные материалы	229
22.7. Сэндвич-панели в строительстве.....	233
22.8. Теплоизоляционные панели.....	235
Глава 23. Теплоизоляция ограждающих конструкций зданий.....	238
23.1. Классификация домов по энергоэффективности.....	238
23.2. Теплоизоляция наружных стен зданий.....	239
23.3. Теплоизоляция деревянных домов	243
Глава 24. Потери теплоты через окна	248
24.1. Строительное стекло. Физико-технические свойства	248
24.2. Стеклопакеты.....	253
24.3. Оконные профили	255
24.4. Дополнительные решения, усиливающие теплозащитные свойства окон	257

24.5. Поликарбонат — светопрозрачный материал.....	258
Глава 25. Светотехника.....	262
25.1. Основные световые характеристики. Нормирование показателей освещения.....	262
25.2. Лампы освещения.....	264
25.3. Энергосбережение в освещении.....	268
25.4. Освещение сельскохозяйственных объектов.....	271
Глава 26. Отопление домов и коттеджей.....	275
26.1. Водяное отопление.....	275
26.2. Коллекторная система водяного отопления.....	279
26.3. Воздушное отопление дома и коттеджа.....	280
26.4. Воздушное отопление сельскохозяйственных объектов.....	283
26.5. Лучистое отопление.....	286
26.6. Газовые лучистые обогреватели.....	288
26.7. Лучистые электрообогреватели.....	291
26.8. Эффективность системы теплоснабжения.....	296
26.9. Выбор и стоимость системы отопления частного дома.....	298
Глава 27. Вентиляция помещений и сооружений.....	303
27.1. Вентиляция, общие положения.....	303
27.2. Вентиляция частных домов и коттеджей.....	303
27.3. Вентиляция животноводческих и птицеводческих помещений и теплиц.....	310
27.4. Обеспечение микроклимата в животноводческих и птицеводческих помещениях.....	313
27.5. Современные технологии строительства животноводческих помещений.....	315
27.6. Утилизация теплоты выбросного воздуха.....	317
Глава 28. Кондиционирование воздуха.....	322
28.1. Кондиционирование воздуха. Общие положения.....	322
28.2. Расчет теплопритоков в помещение для выбора кондиционера.....	323
28.3. Типы кондиционеров.....	326
28.4. Кондиционирование транспортных средств.....	332
28.5. Обеспечение параметров микроклимата на объектах агропромышленного комплекса.....	334
ЧАСТЬ ПЯТАЯ. НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ.....	339
Глава 29. Топливные элементы — нетрадиционные источники энергии.....	340
Глава 30. Солнечная энергетика.....	346
30.1. Солнечные коллекторы для отопления дома.....	346
30.2. Солнечная генерация электроэнергии.....	349
30.3. Стоимость и срок окупаемости СЭС.....	354
30.4. Состояние солнечной энергетики в России.....	355

Глава 31. Ветроэнергетические установки	357
31.1. Устройство ветроустановок	357
31.2. Ветроэнергетические установки в России.....	358
31.3. Ветросолнечная электростанция	359
31.4. Солнечные и ветроэнергетические установки в системе энергоснабжения	361
31.5. Потенциал развития солнечной и ветровой энергетики в России	362
ПРИЛОЖЕНИЯ	365
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	372

ВВЕДЕНИЕ

Теплотехника — наука, которая изучает методы получения, преобразования, передачи и использования теплоты, а также принцип действия и конструктивные особенности тепловых машин, аппаратов и устройств. Различают два направления использования теплоты — энергетическое и технологическое.

При энергетическом использовании теплота преобразуется в механическую работу, которую применяют непосредственно для привода различных механизмов либо преобразуют в электрическую энергию в парогазовых установках.

При технологическом или непосредственном использовании теплота служит для осуществления технологических процессов в технических устройствах различного назначения, для изменения физических свойств материалов путем их нагревания или охлаждения, для создания комфортных условий жизни людей и т. д.

Процессы преобразования теплоты в механическую работу или электроэнергию изучает техническая термодинамика. Процессы передачи и непосредственного использования теплоты изучает теплопередача.

В настоящем учебнике изложена дисциплина «Теплотехника», утвержденная Федеральным государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования в качестве обязательной при подготовке специалиста по профилю 660300 «Агроинженерия».

Учебник составлен по материалам наработанных авторами в процессе чтения лекций по теплотехнике студентам неэнергетических специальностей с относительно небольшим объемом аудиторных занятий.

Изложение материала в данном учебнике предусматривает знание студентами физики и математики в объеме университетской программы, поэтому многие понятия в нем не раскрываются в подробностях, а используются как достаточно известные. Особенностью учебника является то, что, материал представлен в нем в определенной, нетрадиционной для таких учебников последовательности.

В учебнике выделены пять частей: в первых двух частях по традиции изложены теоретические основы технической термодинамики и теплопередачи. Остальные части включают прикладные вопросы использования теплоты в сельхозпроизводстве и в сельских поселениях, разделы строительной теплофизики и нетрадиционные и возобновляемые источники энергии.

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ
ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

Глава 1

ОСНОВНЫЕ ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕРМОДИНАМИКИ

1.1. Основные понятия

Техническая термодинамика изучает закономерности взаимного превращения тепловой и механической энергии и свойства тел, участвующих в таких превращениях. На её основе осуществляется расчет и проектирование всех тепловых двигателей, а также всевозможного технологического оборудования.

В термодинамике широко используется понятие *термодинамической системы*, которая представляет собой совокупность материальных тел, находящихся в механическом и тепловом взаимодействии друг с другом и с окружающей средой. Система отделяется от внешней среды материальной или воображаемой поверхностью — *границей системы*, которая может быть *закрытой*, т. е. непроницаемой для вещества, или *открытой*, если граница системы проницаема для вещества.

В самом общем случае система может обмениваться со средой энергией и веществом (массообменное взаимодействие). Такая система называется *открытой*: потоки сжатого воздуха в компрессорах и трубопроводах — пример открытой системы. Если вещество не проходит через границы системы, то она называется *закрытой*.

В тех случаях, когда система не обменивается энергией и веществом с окружающей средой, она называется *изолированной*. Если система не обменивается с окружающей средой только теплом, то она называется теплоизолированной, или *адиабатной*.

Система, имеющая во всех своих частях однородный состав и физические свойства, называется *однородной*. Однородная термодинамическая система, внутри которой нет поверхности раздела фаз, называется *гомогенной*. Система из двух или более фаз называется *гетерогенной*.

Примером гомогенной системы является атмосферный воздух, состоящий из смеси различных газов и водяного пара, а гетерогенной системы — туман, когда наряду с газовой фазой в системе присутствует жидкая (взвешенные капли воды) или твердая (кристаллики льда) фаза.

Рабочим телом в термодинамической системе наиболее часто служат газ, водяной пар, продукты сгорания и др.

1.2. Термические параметры состояния термодинамической системы

Термодинамическая система описывается рядом термодинамических величин, характеризующих ее свойства. При устойчивом состоянии системы эти величины называются параметрами состояния. Параметры состояния подразделяются на термические и калорические.

К *термическим параметрам* состояния относятся давление, температура и удельный объем вещества.

К *калорическим параметрам* термодинамической системы относятся внутренняя энергия U , энтальпия H и энтропия S . Своим названием эти параметры обязаны тому, что ранее они измерялись в калориях.

Калорические параметры являются функциями состояния термодинамической системы и могут быть подсчитаны на основании термических параметров состояния. Рассмотрим физические свойства термических параметров.

Давление обусловлено взаимодействием молекул рабочего тела с поверхностью и численно равно силе, действующей на единицу площади поверхности тела по нормали к последней.

В Международной системе единиц (СИ) давление выражается в паскалях ($1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$). В практических расчетах часто используется $1 \text{ кПа} = 1000 \text{ Па}$ и $1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па}$.

Давление подразделяется на абсолютное $p_{\text{абс}}$, атмосферное $p_{\text{атм}}$, избыточное $p_{\text{изб}}$ и вакуумметрическое $p_{\text{вак}}$. Абсолютное давление отсчитывается от нуля (абсолютного вакуума). Избыточное давление, его еще называют манометрическим давлением, отсчитывается от уровня атмосферного давления (рис. 1.1).

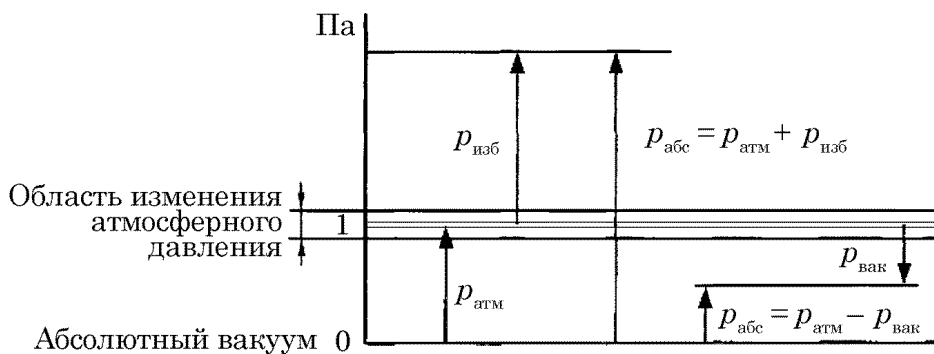


Рис. 1.1

Представление о различных уровнях давления:

l — уровень среднего атмосферного давления.

Давление измеряется при помощи манометров и вакуумметров. В зависимости от вида жидкости (ртуть, вода), используемой в манометре (вакуумметре), давления $p_{\text{изб}}$ и $p_{\text{вак}}$ измеряются в миллиметрах ртутного столба ($1 \text{ мм рт. ст.} = 133,322 \text{ Па}$) или водяного столба ($1 \text{ мм вод. ст.} = 9,80665 \text{ Па}$). Следует отметить, что термическим параметром состояния является абсолютное давление. Именно оно входит в термодинамические уравнения и в дальнейшем обозначается p .

Температура — это мера средней кинетической энергии поступательного движения молекул. Температура, при которой полностью прекращается тепловое движение молекул, принята за абсолютный нуль ($-273,15^\circ\text{C}$) как

начало отсчета. В системе СИ единицей температуры является Кельвин (К); на практике широко применяется градус Цельсия ($^{\circ}\text{C}$). Соотношение между абсолютной T и стоградусной t температурами имеет вид

$$T = t + 273,15. \quad (1.1)$$

На практике температуру измеряют с помощью жидкостных термометров, пирометров, термопар, тепловизоров и других приборов.

Параметром состояния является абсолютная температура T , выраженная в кельвинах, но градус абсолютной шкалы численно равен градусу шкалы Цельсия, так что $dT = dt$.

Полезно сообщить некоторые значения температур, встречающиеся в природе и технике. Средняя температура у сельскохозяйственных животных: у коров и свиней — $38\text{--}39,5^{\circ}\text{C}$, у кур — $40,5\text{--}42,5^{\circ}\text{C}$. Наиболее высокая температура на Земле (58°C) зарегистрирована в Триполи, а наиболее низкая ($-88,2^{\circ}\text{C}$) — в Антрактиде. Вольфрамовая нить газонаполненной лампы нагревается током до 2525°C , а температура поверхности Солнца — около 6000°C .

Удельный объем v — это объем единицы массы вещества. Если однородное тело массой m занимает объем V , то по определению $v = \frac{V}{m}$, $\text{м}^3/\text{кг}$. Величина, обратная удельному объему, является **плотностью рабочего тела**, $\rho = \frac{1}{v}$, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Плотность жидкостей измеряется чаще всего наиболее простым прибором — ареометром. Это калиброванная трубка, заполненная дробью или ртутью для необходимой массы. Трубка погружается в жидкость на глубину, обусловленную плотностью данной жидкости, и по шкале отсчитывается значение плотности. Существуют также плотномеры, измеряющие плотность по гидростатическому, флотационному и другим методам.

Для определения плотности газов используют методы измерений, связанные с использованием определенных физических величин, однозначно зависящих от плотности. Например, замер плотности по скорости распространения звука в веществе (ультразвуковые плотномеры), по частоте и амплитуде колебаний вибрирующего вспомогательного тела (вихревые плотномеры) и др.

Любой газ, в том числе и воздух, является сжимаемой средой, в связи с чем изменение таких параметров, как давление и температура, приводит к изменению объема одного и того же количества частиц газа. По этой причине измеренный в рабочих условиях объем газа приводится к стандартным условиям. В соответствии с ГОСТ Р ИСО 8573-1-2016, условия для определения объема газа при внешних расчетах с потребителями: температура 200C ($293,15\text{K}$), абсолютное давление $100\text{ кПа} \approx 1\text{ бар}$, относительное давление водяного пара — 0.

Необходимо отметить, что приведение измеренного расхода газа к стандартным условиям прописано в «Правилах учета газа», утвержденных приказом Минэнерго России от 30.10.2013 № 961.

Наряду со стандартными условиями в учебной литературе по физике, термодинамике и других применяются нормальные физические условия по DIN 1343, параметры которых совпадают с тройной точкой воды (температура равновесия между льдом, водой и паром): $p_0 = 101,325 \text{ кПа}$ (760 мм рт. ст.), $T_0 = 273,15 \text{ К}$ (0°C), влажность 0%.

1.3. Уравнение состояния идеального газа

Уравнение, связывающее между собой параметры состояния, называется *уравнением состояния* вещества. Опыт показывает, что удельный объем, температура и давление таких систем, как газы и пары, связаны термическим уравнением состояния вида $\varphi(p, v, T) = 0$. Уравнению состояния можно придать и другие формы: $p = \varphi_1(v, T)$; $v = \varphi_2(p, T)$; $T = \varphi_3(p, v)$, которые показывают, что из трех основных параметров независимыми являются два любых. Уравнение состояния можно вывести из молекулярно-кинетической теории газов или совместного рассмотрения законов Бойля — Мариотта и Гей-Люссака. Уравнение для 1 кг массы газа было получено Клайпероном (1834):

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

где R — газовая постоянная, представляющая работу 1 кг газа в процессе при постоянном давлении и изменении температуры на один градус, Дж/(кг·°C).

Газ, состояние которого точно описывается уравнением (1.2), называется **идеальным газом**. Идеальный газ — это совокупность молекул, которые имеют исчезающе малые размеры, находятся в беспорядочном тепловом движении и взаимодействуют друг с другом лишь при соударениях. Понятие идеального газа — это модель реального газа, дающая хорошую сходимость с практикой. Для состояний газа, близких к состоянию сжижения, например насыщенного пара, модель идеального газа неприемлема. Для произвольного количества вещества массой m уравнение состояния имеет вид

$$pV = mRT, \quad (1.3)$$

где V — объем m (кг) газа.

Несколько позднее Д. И. Менделеев (1874) на основании закона Дальтона («В равных объемах разных идеальных газов, находящихся при одинаковых температурах и давлениях, содержится одинаковое количество молекул») предложил универсальное уравнение состояния для 1 кг газа — уравнение Клайперона — Менделеева:

$$pv = \frac{R_\mu T}{\mu}, \quad (1.4)$$

где μ — молярная (молекулярная) масса газа, кг/кмоль; R_μ — универсальная газовая постоянная, $R_\mu = 8314,4 \text{ Дж/(кмоль·°C)}$.

Газовая постоянная конкретного газа:

$$R = 8314,4/\mu. \quad (1.5)$$

Для произвольной массы газа уравнение Клайперона — Менделеева имеет вид

$$pV = \frac{mR_{\mu} T}{\mu}. \quad (1.6)$$

Физические постоянные некоторых газов приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Физические постоянные некоторых газов

Газ	Химическая формула	Молекулярная масса, μ	Газовая постоянная R , Дж/(кг·°C)	Плотность при стандартных условиях, кг/м ³
Азот	N ₂	28,02	296,8	1,250
Кислород	O ₂	32	259,8	1,429
Воздух	—	28,96	287,055	1,205
Водород	H ₂	2,016	4124,3	0,090
Водяной пар	H ₂ O	18,016	481,52	0,804
Оксид углерода	CO	28	296,8	1,250
Углекислый газ	CO ₂	44	189,0	1,977

1.4. Термодинамический процесс

Термодинамический процесс — это любое изменение в термодинамической системе, связанное с изменением во времени хотя бы одного из параметров ее состояния. Например, при перемещении поршня в цилиндре совершается процесс расширения или сжатия газа, при этом изменяется не только объем, но и давление и температура газа. Процессы могут быть равновесными или неравновесными, обратимыми или необратимыми.

Если все термодинамические параметры постоянны во времени и одинаковы во всех точках системы, то такое состояние системы называется *равновесным*. Если между различными в системе компонентами существует разность температур, давлений и других параметров, то она называется *неравновесной*. Любой реальный процесс в той или иной степени является неравновесным, но степень неравновесности будет тем меньше, чем меньше скорость протекания процесса. Поэтому равновесный процесс является предельным случаем неравновесного процесса, когда скорость протекания процесса стремится к нулю. Опыт показывает, что изолированная система с течением времени всегда приходит в состояние равновесия, которое остается затем неизменным. В классической термодинамике рассматриваются только равновесные системы. В диаграммах можно изобразить только равновесные состояния и процессы.

Обратимым называется равновесный процесс, который можно осуществить в прямом и обратном направлениях через одни и те же промежуточные состояния без дополнительных затрат энергии. В процессах сжатия и расширения рабочего тела обязательным условием обратимости является отсутствие трения, а в процессах передачи тепла от одного тела к другому — равенство температур тел, обменивающихся теплом. Реальные процессы необратимы.

При протекании любого процесса (рис. 1.2) происходит изменение параметров $\Delta p, \Delta v, \Delta T$ независимо от его характера ($1-a-2$), ($1-d-2$), ($2-b-1$). Математически это означает, что dp, dv, dT являются полными дифференциалами функций:

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

Для замкнутого процесса или цикла ($1-a-2-b-1$) изменение любого параметра равно нулю:

$$\int dp = 0, \int dv = 0, \int dT = 0.$$

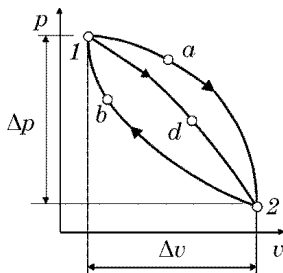


Рис. 1.2

Графическое изображение процессов расширения рабочего тела (кривые $1-a-2$ и $1-d-2$) и сжатия (кривая $2-b-1$)

Уравнение состояния как соотношение между тремя переменными может быть представлено в виде термодинамической поверхности (рис. 1.3a) в пространстве с координатами p, v, T .

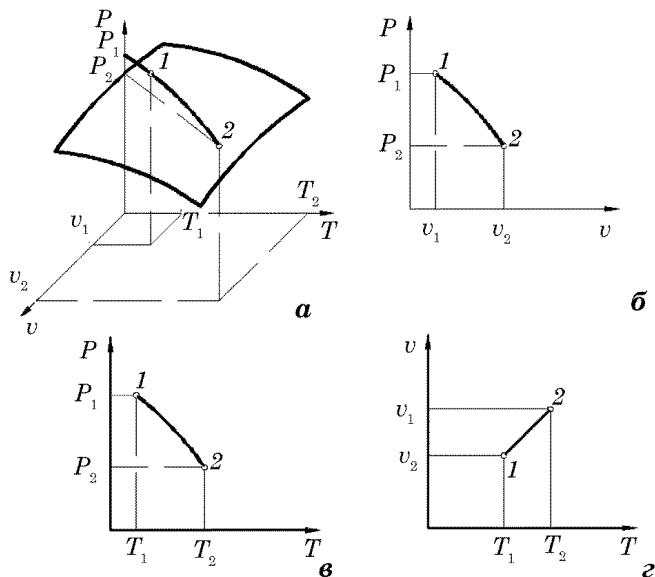


Рис. 1.3

Графическое представление термодинамических процессов

Процесс перехода системы от состояния 1 в состояние 2 графически изображается на термодинамической поверхности кривой 1–2. В трехмерных координатах графическое представление процессов затруднено, поэтому в технике эту поверхность чаще всего описывают семейством кривых в плоскости двух координат тем же способом, как рельеф местности изображается с помощью горизонталей. На рисунке 1.2б показана проекция процесса 1–2 на плоскости p, v , на рисунке 1.2в — на плоскости p, T и на рисунке 1.2г — на плоскости v, T .

1.5. Теплоемкость газов

Теплоемкостью тела называется количество теплоты, которое нужно затратить в данном процессе, чтобы нагреть тело на один градус. Изменение температуры тела при одном и том же количестве сообщаемой теплоты зависит от характера происходящего при этом процесса, поэтому теплоемкость является функцией процесса. Последнее означает, что одно и то же рабочее тело в зависимости от процесса требует для своего нагревания на один градус различного количества теплоты. Численно величина теплоемкости изменяется от $+\infty$ до $-\infty$.

В термодинамических расчетах газов широко используются:

- удельная массовая теплоемкость при постоянном давлении:

$$c_p = \frac{\delta q_p}{dT}, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}); \quad (1.7)$$

- удельная объемная теплоемкость при постоянном объеме:

$$c_v = \frac{\delta q_v}{dT}, \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}), \quad (1.8)$$

где δq_p и δq_v — это количество теплоты, подведенной к телу в процессе при постоянном давлении и при постоянном объеме соответственно.

Для идеального газа существует соотношение (уравнение Майера)

$$c_p - c_v = R. \quad (1.9)$$

В изохорном процессе ($v = \text{const}$) теплота, сообщаемая газу, идет лишь на изменение его внутренней энергии, тогда как в изобарном процессе ($p = \text{const}$) теплота расходуется на увеличение внутренней энергии и на совершение работы расширения; поэтому c_p больше c_v на величину этой работы. Отношение теплоемкостей $\frac{c_p}{c_v} = k$ называется показателем адиабаты или коэффициентом Пуассона. Для идеального газа $k = \frac{c_p}{c_v} = \frac{c_v + R}{c_v} = 1 + R/c_v$, отсюда $c_v = \frac{R}{k-1}$, $c_p = \frac{k}{k-1}R$.

Расчетный показатель адиабаты принимается: для одноатомного идеального газа — $k = 1,66$, для двухатомного — $k = 1,4$, для трех- и многоатомных газов — $k = 1,33$, для выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания — $k = 1,33$, для воздуха — $k = 1,4$, для насыщенного водяного пара — $k = 1,135$.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru