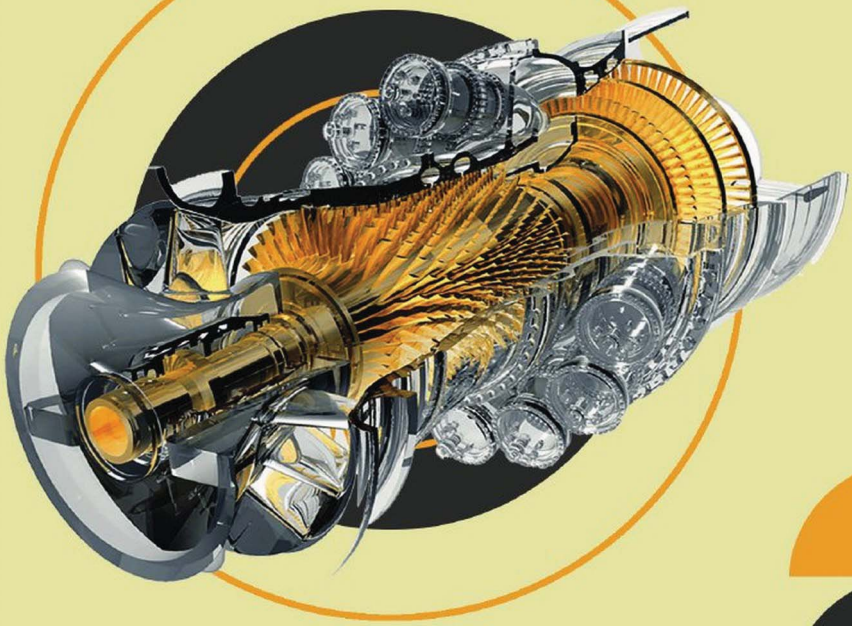


В. Я. Потапов, В. Н. Макаров, Н. В. Макаров

ТЕРМОДИНАМИКА И ГАЗОДИНАМИКА

2-е издание

«Инфра-Инженерия»

УДК 536:532.526
ББК 31.31
П64

Печатается по решению
учебно-методического совета
Уральского государственного горного университета

Рецензенты:
д-р техн. наук, зав. кафедрой оборудования и автоматизации силикатных производств ФГАОУ ВО «УрФУ» *В. Я. Дзюзер*;
канд. геол.-минерал. наук, зав. кафедрой технологии и техники разведки месторождений полезных ископаемых ФГБОУ ВО «УГГУ» *С. Г. Фролов*

Потапов, В. Я.

П64 Термодинамика и газодинамика : учебник / В. Я. Потапов, В. Н. Макаров, Н. В. Макаров. – 2-е изд. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2026. – 272 с. : ил., табл.

ISBN 978-5-9729-2865-1

Изложены законы термодинамики и газодинамики, термодинамические и газодинамические процессы. Рассмотрены основы теории подобия и конвективного теплообмена, вопросы истечения газов и пара, газодинамики струй и всасывающих факелов, а также аэродинамики зданий. Представлены законы теплопроводности при стационарном и нестационарном режимах. Приведены основные положения теории пограничного слоя, потенциальных течений несжимаемой жидкости.

Для студентов и аспирантов газовых, машиностроительных и горных вузов. Может быть полезно инженерно-техническим и научным работникам газовой и горнорудной промышленности.

УДК 536:532.526
ББК 31.31

ISBN 978-5-9729-2865-1

© Потапов В. Я., Макаров В. Н., Макаров Н. В., 2026
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2026
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

РАЗДЕЛ 1. ТЕРМОДИНАМИКА 7

ВВЕДЕНИЕ В ТЕРМОДИНАМИКУ И ГАЗОДИНАМИКУ. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕРМОДИНАМИКИ И ГАЗОДИНАМИКИ 7

1.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ 11
1.1.1. Термодинамическая система 11
1.1.2. Термические параметры состояния. Уравнение состояния 13
1.1.3. Смеси идеальных газов 15
1.1.4. Работа и теплота в термодинамическом процессе. Теплоемкость 18
1.1.5. Калорические параметры состояния 23
Примеры решения задач по разделу 24
Контрольные вопросы 26

1.2. ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ И АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГАЗАХ И ПАРАХ 28
1.2.1. Первый закон термодинамики 28
1.2.2. Анализ основных термодинамических процессов идеального газа 30
1.2.3. Общие свойства реальных газов 36
1.2.4. Свойства и процессы водяного пара 38
1.2.5. Влажный воздух 43
Примеры решения задач по разделу 45
Контрольные вопросы 50

1.3. ОСОБЕННОСТИ ТЕРМОДИНАМИКИ ОТКРЫТЫХ СИСТЕМ 52
1.3.1. Уравнение первого закона термодинамики для потока 52
1.3.2. Истечение газов и паров 55
1.3.3. Дросселирование газов и паров 64
Примеры решения задач по разделу 66
Контрольные вопросы 68

1.4. ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ И АНАЛИЗ КРУГОВЫХ ПРОЦЕССОВ 70
1.4.1. Сущность и формулировки второго закона термодинамики 70
1.4.2. Цикл Карно 72
1.4.3. Математическое выражение второго закона термодинамики 75

1.4.4. Работоспособность (эксергия) 77
Примеры решения задач по разделу 78
Контрольные вопросы 80

1.5. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ 82
1.5.1. Основные положения теплопроводности 82
1.5.2. Закон Фурье 83
1.5.3. Дифференциальное уравнение теплопроводности 84
1.5.4. Краевые условия 87
Примеры решения задач по разделу 88
Контрольные вопросы 89

1.6. РЕЖИМЫ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ 90
1.6.1. Теплопроводность при стационарном режиме и граничных условиях первого рода 90
1.6.2. Теплопроводность при стационарном режиме и граничных условиях третьего рода (теплопередача) 95
1.6.3. Теплопроводность при нестационарном режиме 101
Примеры решения задач по разделу 105
Контрольные вопросы 108

1.7. КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН 109
1.7.1. Основные понятия и определения 109
1.7.2. Дифференциальные уравнения конвективного теплообмена 111
1.7.3. Основы теории подобия 112
1.7.4. Моделирование 114
1.7.5. Теплоотдача при вынужденном движении теплоносителя 115
Примеры решения задач по разделу 120
Контрольные вопросы 124

РАЗДЕЛ 2. ГАЗОДИНАМИКА 126

2.1. ОСНОВЫ АЭРОДИНАМИКИ 126
2.1.1. Уравнение неразрывности 126
2.1.2. Уравнение энергии 127
2.1.3. Уравнение количества движения 129
2.1.4. Уравнение движения 130
2.1.5. Уравнение моментов количества движения 133

Примеры решения задач по разделу 134
Контрольные вопросы 138

2.2. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ 139
2.2.1. Пограничный слой 139
2.2.2. Уравнения пограничного слоя для течения вдоль плоской пластины 140
2.2.3. Примеры решения уравнений ламинарного пограничного слоя 142
Примеры решения задач по разделу 143
Контрольные вопросы 145

2.3. ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ТЕЧЕНИЯ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ 146
2.3.1. Плоскопараллельные потоки 150
2.3.2. Источник и сток 152
2.3.3. Плоский вихрь 153
2.3.4. Вихреисточник (вихресток) 156
2.3.5. Диполь 158
Примеры решения задач по разделу 160
Контрольные вопросы 162

2.4. ОБТЕКАНИЕ ТЕЛ ПОТЕНЦИАЛЬНЫМ ПОТОКОМ 163
2.4.1. Бесциркуляционное обтекание круглого цилиндра прямолинейным потоком 163
2.4.2. Обтекание круглого цилиндра с циркуляцией 168
2.4.3. Аэродинамическая сила и аэродинамический момент 170
2.4.4. Скорость витания и скорость трогания 173
2.4.5. Подъемная сила 175
2.4.6. Теорема Жуковского о подъемной силе для решетки профилей 179
Примеры решения задач по разделу 184
Контрольные вопросы 185

2.5. ДВИЖЕНИЕ ГАЗА В КАНАЛАХ 186
2.5.1. Ламинарное и турбулентное движение 186
2.5.2. Расчет падения давления при движении воздуха в каналах некруглого сечения 189
2.5.3. Течение в каналах переменного сечения с изменением направления потоков 191
2.5.4. Аэродинамический расчет разветвленных сетей воздуховодов 194

2.5.5. Воздуховоды и фасонные части 196
2.5.6. Особенности расчета сетей пневмотранспорта..... 197
Примеры решения задач по разделу..... 198
Контрольные вопросы..... 199

2.6. АЭРОДИНАМИКА СТРУЙ И ВСАСЫВАЮЩИХ ФАКЕЛОВ 200
2.6.1. Классификация струй 201
2.6.2. Свободные изотермические струи 203
2.6.3. Неизотермические струи 213
2.6.4. Конвективные струи 217
2.6.5. Всасывающие факелы..... 220
Примеры решения задач по разделу..... 222
Контрольные вопросы..... 224

2.7. АЭРОДИНАМИКА ЗДАНИЙ 225
2.7.1. Обтекание здания воздушным потоком.
Распределение давлений на поверхности зданий 225
2.7.2. Аэродинамические коэффициенты 228
2.7.3. Расход воздуха, проходящего через отверстия.
Определение давлений на наружной поверхности ограждений 230
2.7.4. Аэрация зданий..... 233
2.7.5. Конструктивное оформление аэрационных устройств 238
2.7.6. Неорганизованный воздухообмен 240
2.7.7. Воздушные завесы 240
2.7.8. Обеспечение чистоты атмосферного воздуха 246
2.7.9. Расчет рассеивания в атмосфере вредных веществ
из низких источников 248
Примеры решения задач по разделу..... 251
Контрольные вопросы..... 248

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 264
ЛИТЕРАТУРА 266

РАЗДЕЛ 1. ТЕРМОДИНАМИКА

ВВЕДЕНИЕ В ТЕРМОДИНАМИКУ И ГАЗОДИНАМИКУ. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕРМОДИНАМИКИ И ГАЗОДИНАМИКИ

Во второй половине 19 века наука продвинулась уже далеко вперед в своём развитии и основывалась на фундаментальных знаниях. Некоторые ученые полагали, что в мире практически всё открыто, так как теория эволюции Дарвина и физика Ньютона являются надёжной базой для ответа на любой вопрос, разработанная А. Эйнштейном теория относительности, показала ограниченность ньютоновской физики. Примерно в этот же период времени и начинает бурно развиваться термодинамика и газодинамика.

«Термодинамика и газодинамика являлись ареной острой идеологической борьбы» (Гельфер Я. М. «История и методология термодинамики и статистической физики», с-5). Дискуссии, которые возникали между сторонниками теории теплорода и молекулярно-кинетической теории, можно принять за начало развития термодинамики. «Теория теплорода основывалась на метафизической концепции невесомых флюидов, а молекулярная теория отражала физическую реальность. В 19 веке возникли такие идеалистические философские концепции как механицизм и энергетизм, сторонники которых вели непримиримую борьбу против последователей атомистического мировоззрения» (Гельфер Я. М. «История и методология термодинамики и статистической физики», с-5).

Газодинамика (или газовая динамика) – раздел механики, изучающий законы движения газообразной среды и её взаимодействия с движущимися в ней твёрдыми телами. Чаще встречается под названием аэродинамика (от др.-греч. ἀηρ – воздух и δύναμις – сила), но включает в себя не только аэродинамику, но и собственно газовую динамику. Последняя исторически возникла как дальнейшее развитие и обобщение аэродинамики, и именно поэтому часто говорят о единой науке – аэрогазодинамике. Как часть физики, аэрогазодинамика тесно связана с термодинамикой и акустикой.

В первой четверти 19 века, были сделаны два крупных открытия теоретического характера. Первое исследование было произведено Жан Батистом Фурье. Его работа «Аналитическая теория тепла» содержала математическую теорию теплопроводности Кудрявцев И. С. «Курс истории физики» (электронная версия книги)». Вторая работа теоретического характера была выполнена Сади Карно, его труд – «Размышления о движущей силе огня». Работа стала началом

термодинамики, им был введен в термодинамику метод циклов. Карно удалось сформулировать общий метод решения задачи – термодинамический метод, к этому способу он пришел, отталкиваясь от задачи подсказанной практикой.

Следующим шагом в развитии физики тепловых процессов был закон сохранения и превращения энергии. Всё большее внимание ученые уделяли изучению процессов превращения теплоты в работу, возникали и развивались идеи о взаимопревращаемости сил природы друг в друга. Исследованием эквивалентности теплоты и работы, а также законом сохранения и превращения энергии занимались такие ученые как Майер, Джоуль, Ленц. Майер и Джоуль пришли к открытию эквивалентности теплоты и работы независимо друг от друга, Джоулю и Ленцу удалось открыть закон сохранения и превращения энергии, также вне зависимости друг от друга и практически одновременно.

Следующий шаг в развитии термодинамики, является открытие второго начала термодинамики. Второе начало было сформулировано несколькими учеными, которые сделали это самостоятельно независимо друг от друга.

В зависимости от метода изучения газодинамику делят на теоретическую и экспериментальную.

В теоретической газодинамике для изучения явлений используют средства математики.

Экспериментальная газодинамика изучает те же явления на основе наблюдения, натурных экспериментов или моделирования явлении в аэродинамических лабораториях.

Современная газодинамика подразделяется на несколько самостоятельных частей в зависимости от теоретической схемы воздуха:

1. Гидродинамика.
2. Газовая динамика.
3. Супердинамика.
4. Гипердинамика.
5. Магнитодинамика.

Гидродинамика изучает законы движения газов на небольших дозвуковых скоростях, на которых воздух ведет себя как жидкость.

Газовая динамика – это наука, изучающая законы движения воздуха на околозвуковых скоростях, на которых проявляется сжимаемость воздуха.

Супердинамика изучает движение воздуха на больших высотах, где воздух очень разрежён.

Гипердинамика изучает движение воздуха на скоростях, в 5 и более раз превышающих скорость звука.

Магнитодинамика изучает движение воздуха на очень больших гиперзвуковых скоростях, на которых происходит ионизация и диссоциация молекул воздуха и воздух становится плазмой.

Газомеханика – раздел механики, изучающий равновесие и движение газообразных сред и механические воздействия этих сред на погруженные в них твердые тела. Газомеханика подразделяется на газостатику и газодинамику.

Газостатика – раздел газомеханики, изучающий условия равновесия газов и действие неподвижных газов на погруженные в них твердые тела.

Газодинамика – раздел газомеханики, изучающий законы движения газообразной среды и ее силовое взаимодействие с неподвижными или движущимися в ней обтекаемыми твердыми телами и являющийся теоретической основой авиации, метрологии, вентиляции и кондиционирования воздуха. Основные задачи, решаемые газодинамикой, – определение подъемной силы и силы сопротивления; распределение давления и скоростей; направления струй на поверхности твердых тел, находящихся в воздушном потоке. Этот раздел связан с решением широкого круга задач, являющихся основными при исследовании, расчете, конструировании, наладке и эксплуатации оборудования и систем вентиляции и кондиционирования воздуха.

В основу решения этих задач положены следующие уравнения газодинамики: неразрывности или сплошности потока; энергии; количества и моментов движения; теории деформации; движения и др.

Воспитательное значение термодинамики и газодинамики связано с тем, что методологические и философские вопросы, возникающие в связи с открытием и развитием принципов термодинамики и газодинамики, способствовали правильному пониманию природы тепловых и газодинамических явлений и оказывали большое влияние на формирование фундаментальных представлений современной физики.

Ускорение научно-технического прогресса выдвигает перед всеми отраслями промышленности задачи создания новых машин, тепловых двигателей, аппаратов, приборов, разработки новых технологических процессов. Технические задачи становятся все более сложными и все чаще для их решения приходится использовать наиболее совершенный аппарат современной физики и математики, а в ее состав входят техническая термодинамика и газодинамика.

Особо важное значение в горнорудной промышленности приобретает повышение в оптимальных пределах единичной мощности машин и оборудования при одновременном уменьшении их габаритов, металлоемкости, энергопотреблении и снижения их стоимости, а также увеличение коэффициента сменности.

При повышении технико-экономических показателей горных и геологоразведочных предприятий особую роль играют насосные, вентиляторные, пневматические и подъемные установки. Поэтому для более эффективной эксплуатации стационарных установок горному инженеру необходимы глубокие теоретические и практические знания рудничных насосных, вентиляторных, пневматических и подъемных установок.

Наиболее актуальные задачи, которые решают с использованием термодинамики и газодинамики (аэродинамика, теплопередачи): проектирование тепловых и атомных электрических станций, магнитогидродинамических регуляторов (установок для прямого преобразования теплоты в электрическую энергию), холодильных установок; проектирование вентиляторных установок, пневмоустановок, компрессоров, гидротурбин, газотурбинных установок и разработка технологических процессов в пищевой, химической и других отраслях промышленности. В перечисленных задачах термодинамические и газодинамические процессы играют важную, а иногда и определяющую роль при выборе конструкции.

Гидрогазодинамика (гидравлика) представляет собой теоретическую дисциплину, изучающую вопросы, связанные с механическим движением жидкости в различных природных и техногенных условиях.

Предметом ее исследования являются основные законы равновесия и движения жидкостей и газов. В общем случае, в этой дисциплине можно выделить несколько разделов: *гидростатику* (изучает законы равновесия жидкостей) и *гидродинамику* (изучает основные законы движения жидкостей и раскрывает причину движения).

Широкое использование в практической деятельности человека различных гидравлических машин и механизмов ставят гидравлику в число важнейших дисциплин, обеспечивающих научно-технический прогресс.

1.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

1.1.1. Термодинамическая система

Термодинамической системой называется совокупность материальных тел, находящихся в энергетическом взаимодействии между собой и окружающей средой.

Термодинамическая система, которая не может обмениваться энергией с окружающей средой, называется *изолированной*. Однородная система, состоящая из одной фазы вещества, называется *гомогенной*. В соответствии с тремя видами агрегатного состояния различают твердую, жидкую и газообразную фазы. Система, состоящая из нескольких различных гомогенных частей, имеющих поверхности раздела, называется *гетерогенной*.

По роли отдельных тел, входящих в термодинамическую систему, их делят на рабочие тела (РТ), источники теплоты (ИГ) и объекты работы (ОР).

Рабочими телами, как правило, являются газообразные вещества – газы и пары. Принципиального различия между газом и паром нет: газ можно рассматривать как пар соответствующей жидкости, находящийся далеко от состояния сжижения (сильно перегретый пар), а пар – как реальный газ, близкий к состоянию сжижения.

Если можно пренебречь влиянием сил взаимодействия между молекулами и размерами самих молекул (сильно нагретый газ при небольших давлениях), газ называется *идеальным*. В противном случае газ называется *реальным*. Следовательно, один и тот же газ может быть в зависимости от условий и идеальным, и реальным.

Тело, которое отдает теплоту рабочему телу и при этом не изменяет свою температуру, называется *верхним источником теплоты* (ВИТ). Тело, которое получает теплоту от рабочего тела и при этом не изменяет свою температуру, называвшим *нижним источником теплоты* (НИТ).

Рабочее тело, источники теплоты и объект работы образуют так называемую тепломеханическую систему (рис. 1.1), которая и является предметом изучения технической термодинамики.

Совокупность физических свойств, присущих данной системе, называется ее *термодинамическим состоянием*. Макроскопические величины, характеризующие в целом физические свойства тела в данный момент времени, называются *термодинамическими параметрами состояния*. Последние разделяются на интенсивные, не зависящие от массы тела, и экстенсивные – пропорциональные массе.

К основным параметрам состояния, поддающимся измерению, относятся давление p, удельный объем V и абсолютная температура T. Они называются *термическими параметрами состояния*.

К калорическим параметрам состояния относятся внутренняя энергия U, энтальпия i и энтропия S.

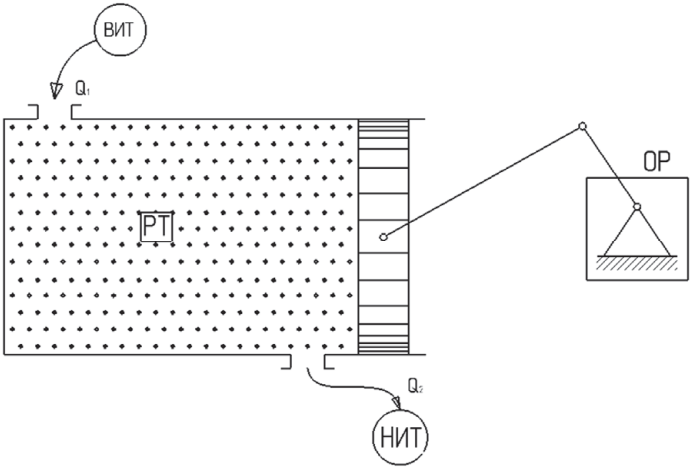


Рис. 1.1. К определению термодинамической системы

Равновесным термодинамическим состоянием называется состояние рабочего тела, которое не изменяется во времени без внешнего энергетического воздействия. Параметры равновесного состояния по всей массе тела одинаковы и равны соответствующим параметрам внешней среды.

Последовательное изменение состояния тела, происходящее в результате энергетического взаимодействия рабочего тела с окружающей средой, называется *термодинамическим процессом*. Процесс, протекающий так медленно, что в системе в каждый момент времени успевает установиться равновесное состояние, называется *равновесным*. В противном случае процесс называется *неравновесным*. Процесс, который протекает через одни и те же равновесные состояния как в прямом, так и в обратном направлениях, называется *обратимым*. Процессы, не удовлетворяющие этому условию, называются *необратимыми*.

Круговым процессом, *или циклом*, называется процесс, в результате осуществления которого рабочее тело возвращается в начальное состояние. Обратимые круговые процессы являются основой теоретических циклов тепловых двигателей и тепловых машин.

1.1.2. Термические параметры состояния. Уравнение состояния

Как отмечалось, к числу термических параметров относятся давление, удельный объем и температура.

Абсолютное давление газа представляет собой средний результат силового воздействия молекул на стенки сосуда и равно отношению нормальной составляющей силы F к площади S, на которую действует сила, т. е. $p = F/S$.

Часто возникает необходимость измерить давление высотой столба h какой-либо жидкости (ртути, воды и др.). Тогда справедливо такое соотношение:

$$p = h\rho g \qquad \text{или} \qquad h = p/(\rho g),$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м^3.

Применяемые в технике приборы для изменения давления фиксируют разность между *абсолютным давлением* $p_{абс}$ и *барометрическим* $p_{бар}$ давлением, т. е. так называемое избыточное давление $p_{изб}$ (рис. 1.2).

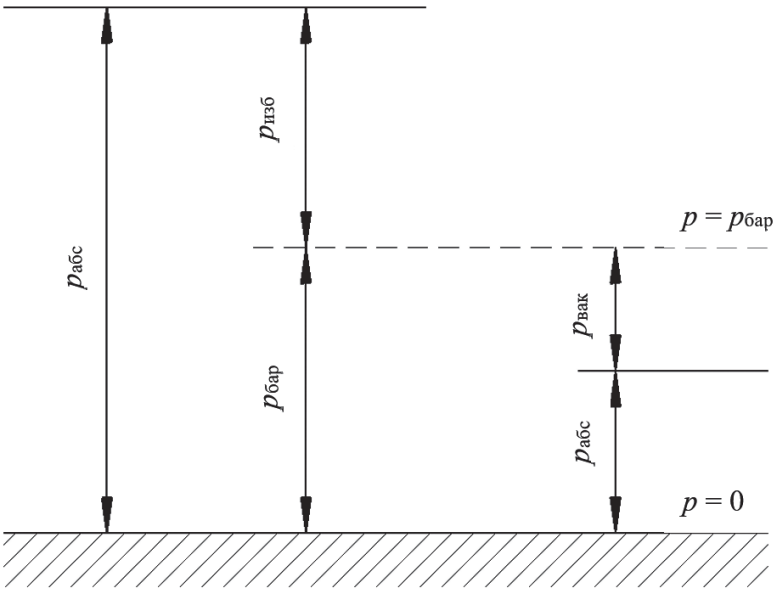


Рис. 1.2. К измерению давления

Если измеряемое абсолютное давление выше барометрического, то

$$p_{изб} = p_{абс} - p_{бар} \qquad \text{или} \qquad p_{абс} = p_{изб} + p_{бар}. \tag{1.1}$$

Величина $p_{изб}$ называется еще *манометрическим*, или рабочим давлением.

Если в сосуде давление меньше атмосферного, то имеет место разрежение. Разность между барометрическим и абсолютным давлением называется *вакуумом*, или р*азрежением*, т. е.

$$p_{вак} = p_{бар} - p_{абс},$$

$$\text{или } p_{абс} = p_{бар} - p_{вак}. \quad (1.2)$$

Одним из важнейших параметров, определяющих тепловое состояние тела, является *температура*. Согласно молекулярно-кинетической теории газов, абсолютную температуру T можно определить как величину, пропорциональную средней кинетической энергии поступательного движения молекул газа, т. е.

$$T = \frac{2}{3k}\frac{mw^2}{2},$$

где k – постоянная Больцмана, равная $1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К;

$\frac{mw^2}{2}$ – средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул.

В системе СИ единицей температуры является градус Кельвина (К); на практике широко применяется градус Цельсия (°С). Связь между температурами по шкале Кельвина (T, К) и Цельсия (t, °С) имеет вид

$$T = t + 273{,}15.$$

Удельный объем – это объем, занимаемый единицей массы вещества, $м^3/кг$: т. е.

$$V = \frac{V}{m}. \quad (1.3)$$

Обратная величина ($I/V = m/V = \rho$) называется плотностью, $кг/м^3$. Следовательно, $V = I/\rho$; $V\rho = I$.

Уравнение состояния идеального газа. Опыт и теория показывают, что параметры p, V и T однородного тела в равновесном состоянии связаны между собой функциональной зависимостью

$$\varphi\,(p, V, T) = 0,$$

которая называется *термическим уравнением состояния*; она позволяет по любым двум известным параметрам состояния вычислить неизвестный третий. Вид функции φ различен и зависит от природы тела.

Наиболее простым уравнением состояния является уравнение Клапейрона – Менделеева для идеального газа:

$$pV = mRT, \quad (1.4)$$

где R – удельная газовая постоянная, зависящая от природы вещества.

Для 1 кг газа уравнение (1.4) запишется так:

$$pV = RT. \tag{1.5}$$

Уравнение состояния для 1 кмоль газа, т. е. для μ, кг, можно получить из уравнения (1.4), если $m = \mu$ и $V = V\mu$:

$$pV\mu = \mu RT, \tag{1.6}$$

где $V\mu$ – объем 1 кмоль газа, м^3/кмоль.

Согласно закону Авогадро, объемы киломолей для всех идеальных газов при одинаковых давлениях и температуре равны. Следовательно, величина μ $R = R\mu = pV\mu/T$ для 1 кмоль любого газа одинакова и носит название *универсальной газовой постоянной.*

Подставив в уравнение (1.6) значение величин при нормальных условиях: $p_н$ = 760 мм рт. ст. = 0,1013 МПа, $V\mu_н$ = 22,4 м^3/кмоль, $T_н$ = 273,15 К, получим:

$$R\mu = \frac{1{,}013 \cdot 10^5 \cdot 22{,}4}{273{,}15} = 8314 \frac{Дж}{кг \cdot К}, \tag{1.7}$$

где μ – молекулярная масса газа, кг/кмоль.

Физический смысл этой величины: работа, которую совершает 1 кмоль любого газа при увеличении его температуры на 1° при p = const.

1.1.3. Смеси идеальных газов

В практике чаще всего применяются в качестве рабочего тела не однородные газы, а их механические смеси. Составляющие смеси чистых веществ называются компонентами. Давление компонента смеси при условии, что компонент занимает весь объем смеси $V_{см}$ при температуре смеси $T_{см}$, называется *парциальным*. Согласно закону Дальтона, абсолютное давление смеси идеальных газов равно сумме парциальных давлений ее компонентов:

$$p_{см} = p_1 + p_2 + \cdots + p_n = \sum_1^n p_i, \tag{1.8}$$

где $p_{см}$ – общее давление смеси газов;

p_1,p_2, …, p_n – парциальные давления соответствующих компонентов смеси.

Объем компонентов V_i смеси, который он имел, если бы находился при полном давлении смеси $p_{см}$ и ее температуре $T_{см}$, называется *парциальным*:

$$V_{см} = V_1 + V_2 + \cdots + V_n = \sum_1^n V_i. \tag{1.9}$$

Состав смеси газов может быть задан массовыми, объемными или мольными долями.

Массовой долей каждого компонента называется отношение массы данного компонента к массе всей смеси:

$$g_1 = \frac{m_1}{m_{см}};\ \ g_2 \frac{m_2}{m_{см}};\ \ \cdots\ \ g_n \frac{m_n}{m_{см}}, \tag{1.10}$$

где $m_{см} = m_1 + m_2 + \cdots + m_n$.

Тогда можно записать: $\sum_1^n g_i = 1$.

Объемной долей компонентов называется отношение приведенного объема компонентов V_i к объему всей смеси $V_{см}$, т. е.

$$r_i = \frac{V_i}{V_{см}}.$$

При этом $\sum_1^n r_i = 1$, так как, согласно выражению (1.9), $\sum_1^n V_i = V_{см}$.

Поскольку температура каждого компонента смеси, заполняющего весь ее объем $V_{см}$, и при приведенном объеме V_i одинакова, то, согласно выражению (1.4):

$$p_i V_{см} = p_{см} V_i,$$

откуда

$$r_i = \frac{V_i}{V_{см}} = \frac{p_i}{p_{см}}. \tag{1.11}$$

Парциальное давление *i*-го компонента

$$p_i = p_{см} r_i. \tag{1.12}$$

Мольные и объемные доли численно равны. Если $\nu_{см}$ – число молей смеси, а ν_i – число молей *i*-го компонента,

то

$$\nu_{см} = \nu_1 + \nu_2 + \cdots \nu_n = \sum_1^n \nu_i.$$

Очевидно, отношение $\nu_i/\nu_{см}$ является мольной долей *i*-го компонента. Обозначив объем 1 кмоль любого газа при давлении и температуре смеси $V\mu$, получим:

$$V_{см} = V\mu\nu_{см};\ \ V_i = V\mu\nu_i\ ,$$

тогда

$$r_i = \frac{V_i}{V_{см}} = \frac{V_\mu \nu_i}{V_\mu \nu_{см}} = \frac{\nu_i}{\nu_{см}}.$$

Средней, или кажущейся молекулярной массой смеси $\mu_{см}$ называется отношение массы всей смеси $m_{см}$ к общему числу ее молей $\nu_{см}$:

$$\mu_{см} = \frac{m_{см}}{\nu_{см}} = \frac{\sum_1^n m_i}{\sum_1^n \frac{m_i}{\mu_i}}.$$

Разделив числитель и знаменатель последней дроби на $m_{см}$, получим:

$$\mu_{см} = \frac{1}{\sum_1^n \frac{g_i}{\mu_i}}. \tag{1.13}$$

Если смесь задана объемными или мольными долями, то выражение для $\mu_{см}$ примет вид:

$$\mu_{см} = \frac{\nu_1}{\nu_{см}}\mu_1 + \frac{\nu_2}{\nu_{см}}\mu_2 + \cdots = r_1\mu_1 + r_1\mu_2 = \sum_1^n r_i\mu_i. \tag{1.14}$$

Связь между массовыми и объемными долями определяется уравнением:

$$q_i = \frac{m_i}{m_{см}} = \frac{\mu_i}{\mu_{см}}\frac{\nu_i}{\nu_{см}} = \frac{\mu_i}{\mu_{см}} r_i \tag{1.15}$$

или учитывается (1.14):

$$q_i = \frac{r_i\mu_i}{\sum_1^n r_i\mu_i}. \tag{1.16}$$

Для пересчета массовых долей в объемные пользуются соотношением:

$$r_i = \frac{\frac{g_i}{\mu_i}}{\sum_1^n \frac{g_i}{\mu_i}} = \frac{g_i}{\mu_i}\mu_{см}. \tag{1.17}$$

Уравнение состояния для смеси идеальных газов может быть получено исходя из следующих соображений:

$$p_i V_{см} = m_1 R_1 T_{см} = g_1 m_1 R_1 T_{см};$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots$$
$$p_n V_{см} = m_n R_n T_{см} = g_n m_{см} R_n T_{см}.$$

Суммируем левые и правые части:

$$V_{см}\sum_1^n p_i = m_{см} T_{см}\sum_1^n g_i R_i. \tag{1.18}$$

Учитывая, что $\sum_1^n p_i = p_{см}$,

$$p_{см} V_{см} = m_{см} R_{см} T_{см}. \tag{1.19}$$

Величину $R_{см}$ можно назвать газовой постоянной для 1 кг смеси, которая из сравнения выражений (1.18) и (1.19) выразится так:

$$R_{см} = \sum_1^n g_i R_i. \tag{1.20}$$

Газовую постоянную смеси можно выразить, согласно выражению (1.7), через среднюю молекулярную массу смеси, Дж/(кг·К):

$$R_{см} = \frac{8314}{\mu_{см}}. \quad (1.21)$$

Представленное уравнение (1.21) позволяет уточнять фазовую постоянную либо состав смеси газов.

1.1.4. Работа и теплота в термодинамическом процессе. Теплоемкость

Один из способов передачи энергии от одного тела к другому связан с наличием разности температур. Передача энергии в этом случае осуществляется либо путем непосредственного соприкосновения этих тел, либо с помощью излучения. Количество переданной энергии называется теплотой Q, а сам процесс – теплопередачей.

Другой способ передачи энергии представляет собой процесс силового воздействия одного тела на другое, сопровождающийся видимым перемещением другого тела. При этом одно тело совершает над другим телом механическую работу L.

Таким образом, работа и теплота являются двумя способами (формами) передачи энергии в термодинамическом процессе и одновременно мерой переданной энергии.

Аналитическое выражение для работы процесса. Передачу энергии от одного тела к другому, связанную с изменением объема рабочего тела, с перемещением его во внешнем пространстве или с изменением его положения, называют *работой*.

Совершаемая газом работа при его расширении зависит от изменения параметров состояния p, V и T.

При равновесном процессе аналитическое выражение для работы, отнесенной к 1 кг вещества, имеет вид

$$dl = pdv, \quad (1.22)$$

а для конечного процесса, в котором объем изменяется от V_1 до V_2, общее выражение для работы примет вид, Дж/кг:

$$l = \int_{V_1}^{V_2} pdv. \quad (1.23)$$

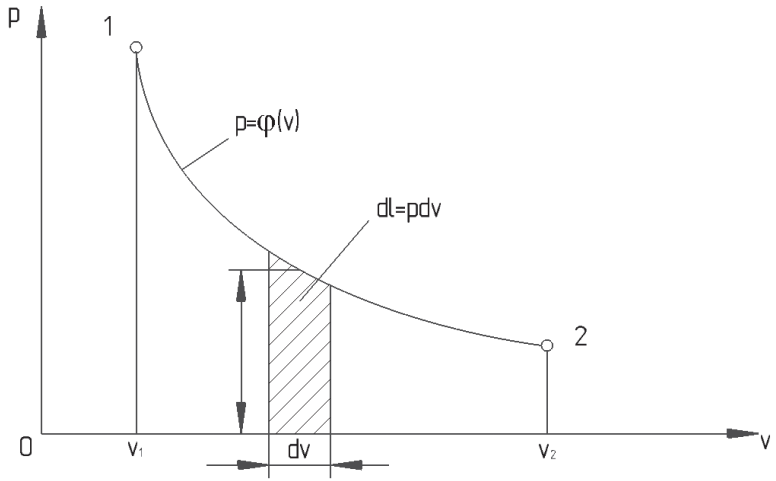


Рис. 1.3. К вычислению работы в термодинамическом процессе

В общем случае давление – величина переменная, зависящая от *V*. Для вычисления интеграла (1.23) должна быть известна зависимость между ними в данном процессе, т. е. уравнение процесса $p = \varphi(v)$. Графически эта зависимость может быть изображена в *p*, *v* – координатах в общем случае кривой 1–2 (рис. 1.3).

Очевидно, что величина работы будет зависеть от характера кривой процесса и определяться в *p*, *v* – координатах площадью, ограниченной кривой процесса, двумя ординатами и осью абсцисс, т. е.

$$l = \int_{V_1}^{V_2} pdv = \text{пл.}\, 12V_2V_1.$$

Из выражения (1.22) следует, что величина *l* имеет тот же знак, что и *dv*, так как абсолютное давление *p* всегда положительно. Следовательно, работа расширения положительна ($dv > 0$), работа сжатия отрицательна ($dv < 0$).

Вычисление количества теплоты. Теплоёмкость. На основании опыта удельное количество теплоты *dq* в равновесном процессе может быть найдено в виде произведения, кДж/кг:

$$dq = Tds, \tag{1.24}$$

где *T* – абсолютная температура;

s – удельная энтропия.

Поскольку абсолютная температура *T* всегда положительна, то знак величины теплоты будет определяться знаком изменения энтропии. Процесс увеличения энтропии ($ds > 0$) означает подвод теплоты к телу, т. е. количество теплоты

имеет положительный знак ($dq > 0$ и $q > 0$). Процесс уменьшения энтропии ($ds < 0$) соответствует отводу теплоты от тела, т. е. количество теплоты имеет отрицательный знак ($dq < 0$ и $q < 0$).

Для конечного процесса, в котором энтропия изменяется от s_1 до s_2, общее выражение для количества теплоты принимает вид:

$$q = \int_{S_1}^{S_2} Tds. \qquad (1.25)$$

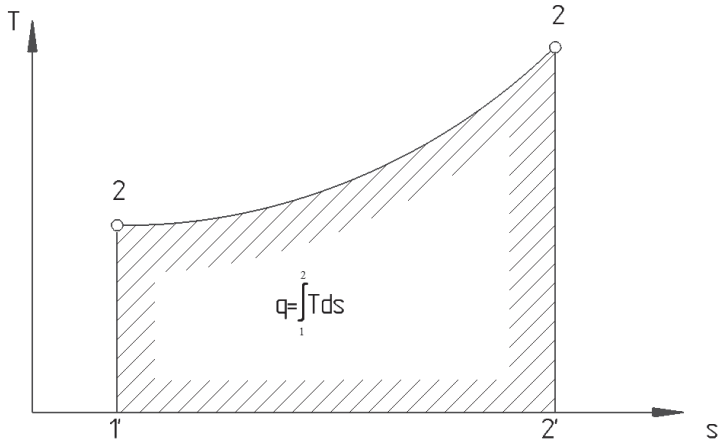


Рис. 1.4. К вычислению теплоты в термодинамическом процессе

Для вычисления интеграла (1.25) в каждом конкретном процессе должна быть известна зависимость между энтропией *s* и температурой *T*, т. е. уравнение в процессах в *T*-, *s*-координатах $s = \varphi(T)$. В общем случае графически эта зависимость может быть изображена в *T*-, *s*-координатах кривой 1–2 (рис. 1.4).

Подобно тому, как на *p*, *v*-диаграмме площадь, ограниченная кривой процесса и осью абсцисс, изображает работу, на *T*, *s*-диаграмме площадь, ограниченная кривой процесса, осью абсцисс и двумя ординатами, представляет собой количество теплоты, участвующей в процессе, т. е.

$$q = \int_{S_1}^{S_2} Tds = \text{пл.}$$

Существует еще один способ вычисления количества теплоты, связанный с понятием теплоемкости тела в процессе.

Теплоемкость тела есть отношение количества теплоты, подведенной в процессе, к соответствующему изменению температуры, кДж/К:

$$C = \frac{Q}{t_2 - t_1}.$$