



Миронова Г. А., Брандт Н. Н., Салецкий А. М. Молекулярная физика и термодинамика в вопросах и задачах: Учебное пособие. 1-е изд.

Допущено УМО по классическому университетскому образованию в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности ВПО 010701 — «Физика» и по направлению подготовки ВПО 010700 — «Физика»

ISBN 978-5-8114-1195-5

Год выпуска 2012

Тираж 1000 экз.

Формат 16,5 × 23,5 см

Переплет: твердый

Страниц 480

Цена 1 100,00 руб.

В учебном пособии изложены методические основы решения задач раздела «Молекулярная физика и термодинамика» из курса общей физики. Приводятся подробное решение ряда стандартных задач, анализ и интерпретация полученных результатов, оценка правильности полученных решений. Каждая глава начинается с краткого изложения теории, в которой акцентируется внимание на физической сущности законов и принципов решения задач. Приводятся четкие формулировки законов и определений физических величин. В пособие включены элементы статистической, химической и иерархической термодинамики, где обсуждаются вопросы термодинамики полимеров и живых систем.

Книга предназначена для студентов вузов, изучающих общую физику, и для преподавателей, ведущих семинарские и практические занятия по разделу «Молекулярная физика и термодинамика», а также может быть полезна для широкого круга специалистов и лиц, занимающихся самообразованием.

Рецензенты:

А. Я. Борщевский — доктор химических наук, профессор, зам. зав. кафедрой физической химии химического факультета МГУ; А. В. Уваров — доктор физико-математических наук, профессор физического факультета МГУ.

Введение

В основе учебного пособия лежит методика решения традиционных задач, разработанная для курса общей физики на физическом факультете МГУ имени М. В. Ломоносова. Но кроме того, в связи с заказом государства на выпуск специалистов-физиков широкого профиля, обладающих ассоциативным мышлением и способных быстро адаптироваться в любой области естественнонаучных знаний, в данное пособие включены задачи технической и химической термодинамики, а также обсуждаются вопросы термодинамики полимеров и живых систем — в главе «Элементы иерархической термодинамики».

Молекулярная физика и термодинамика исследуют системы, состоящие из большого числа частиц, и процессы в них, которые являются результатом совместного действия всех частиц системы. Поведение каждой молекулы в отдельности подчиняется законам механики. В системе большого числа частиц возникает качественно новый вид движения — тепловое движение. В результате совокупность огромного числа молекул приобретает качественно новые свойства и характеризуется новыми параметрами (например, давлением и температурой), которых нет у отдельных молекул.

Существует два подхода к описанию ансамблей большого числа частиц: термодинамический и статистический.

Термодинамика начала развиваться как чисто эмпирическая наука, и лишь впоследствии ее законы были подтверждены статистической физикой. Статистические методы дают возможность определять средние значения физических величин, позволяют более глубоко раскрыть физический смысл термодинамических законов и термодинамических характеристик, таких как температура и энтропия. «В настоящее время, — пишет И. П. Базаров в учебнике по термодинамике, — нет никаких оснований для проведения резкой грани между термодинамикой и статистической физикой...»

Общая термодинамика — наука о наиболее общих свойствах макроскопических систем и происходящих в них независимо от микроскопических характеристик системы процессах: природы частиц, образующих систему, и типов

взаимодействия между ними. Это наука об энергии, о формах ее перехода от одной системы к другой и преобразовании ее в физических, химических, биологических и других процессах.

К специфическим особенностям термодинамического метода можно отнести, например, следующие. Во-первых, из-за наличия уравнения состояния, связывающего параметры состояния (для газа с постоянным числом частиц такими параметрами являются давление p , объем V и температура T), возникает возможность описывать каждое явление (процесс) многими способами. Например, для газа можно описывать процесс как зависимость давления от температуры $p(T)$ или давления от объема $p(V)$ или температуры от объема $T(V)$ и т. п. Во-вторых, кроме p , V , T функциями состояния для термодинамических систем являются: энтропия S , внутренняя энергия U и любые комбинации этих параметров.

Термодинамика является, пожалуй, единственной наукой, чьи методы используются во всех естественнонаучных исследованиях. Методы термодинамики имеют универсальный характер и используются в физике, химии, геологии, биологии и других областях естествознания. Поэтому в общей термодинамике выделились отдельные разделы. Приведем в качестве примера некоторые из них: статистическая термодинамика (дает молекулярно-статистическое обоснование общей термодинамике и всем ее разделам, основываясь на методах теории вероятности и математической статистики); физическая термодинамика; химическая термодинамика (изучение химического равновесия и направления химических процессов); термодинамика поверхностных явлений; электрохимическая термодинамика; термодинамика необратимых (неравновесных) процессов (теплопередачи, диффузии и т. п., а также процессов самоорганизации пространственных и временных структур в физико-химических явлениях) — устанавливает неравенства, указывающие направление необратимых процессов; термодинамика иерархических систем (изучает сложные биологические системы, открытые для обмена энергией и веществом); вычислительная термодинамика (используется в химической, металлургической, топливной и др. отраслях промышленности). Численные расчеты на ЭВМ условий равновесия в сложных многокомпонентных (10–100 компонентов) системах являются теоретическими основами технологических процессов, например, выбора ракетного топлива, соотношения компонентов, параметров рабочего процесса в ракетных двигателях.

Чтобы получить полное представление о термодинамике и ее методах в курсе общей физики, необходимо рассмотреть основные законы и концепции, развиваемые в каждом из указанных выше разделов. Использование законов термодинамики в различных областях человеческой деятельности — физике, технике, химии и биологии — позволяет, во-первых, расширить кругозор обучающегося, во-вторых, понять мир в его целостности и многообразии и, в-третьих, осмыслить фундаментальную роль физических законов в явлениях природы.

Авторы выражают искреннюю признательность и благодарность рецензентам: профессорам кафедры молекулярной физики физического факультета МГУ: Алексею Иосифовичу Осипову и Александру Викторовичу Уварову, профессору кафедры химической физики химического факультета МГУ Андрею Яковлевичу Борщевскому, профессору кафедры общей физики физического факультета МГУ Владимиру Александровичу Караваеву, а также сотрудникам кафедры общей физики физического факультета МГУ: Елене Александровне Никаноровой, Александру Семеновичу Нифанову и Николаю Егоровичу Сырьеву за полезные обсуждения и ценные замечания.

Миронова Г. А., Брандт Н. Н., Салецкий А. М. Молекулярная физика и термодинамика в вопросах и задачах: Учебное пособие. 1-е изд.

Оглавление

[Введение 5](#)

[Глава 1. Элементы комбинаторики. Вероятность. Биномиальное распределение 8](#)

- 1.1. Элементы комбинаторики 8
 - 1.2. Случайная величина. Вероятность 11
 - 1.3. Вероятность сложных событий 13
 - 1.4. Статистическая система. Микро- и макросостояния. Биномиальное распределение 15
 - 1.5. Наиболее вероятное и среднее значения. Дисперсия случайной величины, подчиняющейся биномиальному закону 21
 - 1.6. Непрерывная случайная величина. Функция плотности вероятности 25
 - 1.7. Предельные формы биномиального распределения. Распределения Пуассона и Гаусса 30
- Задачи для самостоятельного решения 42

[Глава 2. Статистическое описание термодинамических систем. Равновесное состояние. Температура 44](#)

- 2.1. О термодинамическом статистическом законе 44
 - 2.2. Описание изолированной системы дискретных случайных величин 45
 - 2.3. Микросостояния изолированной системы молекул идеального газа 51
 - 2.4. Неизолированные системы. Условие теплового равновесия. Температура 54
 - 2.5. Вероятность микросостояния термодинамической системы. Распределение Гиббса 60
 - 2.6. Вероятность макросостояния термодинамической системы 62
- Приложение 2.1. Примеры применения распределения Гиббса 62
- Задачи для самостоятельного решения 71

[Глава 3. Распределение Максвелла 72](#)

- 3.1. Идеальный газ в термостате. Распределение молекул идеального газа по кинетической энергии поступательного движения 72
- 3.2. Флуктуации 75
- 3.3. Распределение молекул идеального газа по скоростям 78

| | |
|--|------------|
| 3.4. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеальных газов. Уравнение состояния идеального газа | 87 |
| 3.5. Броуновское движение | 90 |
| Задачи для самостоятельного решения | 94 |
| <u>Глава 4. Распределение Больцмана</u> | <u>99</u> |
| Задачи для самостоятельного решения | 116 |
| <u>Глава 5. Первое начало термодинамики. Теплоемкость</u> | <u>118</u> |
| 5.1. Термодинамическая система. Равновесные процессы | 118 |
| 5.2. Первое начало термодинамики. Составляющие энергетического баланса: внутренняя энергия, работа и теплота | 121 |
| 5.3. Калорические и термические коэффициенты | 126 |
| 5.4. Теплоемкость и составляющие энергетического баланса в процессах с идеальным газом | 128 |
| Приложение 5.1. Теплоемкость твердых тел | 148 |
| Задачи для самостоятельного решения | 154 |
| <u>Глава 6. Энтропия. Второе и третье начала термодинамики</u> | <u>159</u> |
| 6.1. Статистическое определение энтропии. Второе и третье начала термодинамики | 159 |
| 6.2. Термодинамическое определение энтропии | 163 |
| 6.3. Энтропия и теплоемкость | 167 |
| 6.4. Энтропия идеального газа | 171 |
| 6.5. Энтропия смешения | 182 |
| 6.6. Энтропия парамагнитной системы | 185 |
| Приложение 6.1. Об энтропии и стационарных состояниях биологических систем | 187 |
| Задачи для самостоятельного решения | 191 |
| <u>Глава 7. Элементы технической термодинамики. Циклические процессы</u> | <u>195</u> |
| 7.1. Типы тепловых механизмов и их эффективность | 195 |
| 7.2. Двигатели внутреннего сгорания | 204 |
| 7.3. Принцип динамического отопления | 210 |
| Задачи для самостоятельного решения | 212 |
| <u>Глава 8. Термодинамические потенциалы</u> | <u>216</u> |
| 8.1. Введение | 216 |
| 8.2. Термодинамические потенциалы для систем с постоянным числом частиц | 217 |
| 8.3. Свободная энергия Гельмгольца | 219 |
| 8.4. Потенциал Гиббса | 220 |
| 8.5. Открытые системы. Химический потенциал | 221 |
| 8.6. Термодинамические потенциалы и параметры равновесного состояния. Соотношения Максвелла | 223 |
| 8.7. Дифференциалы термодинамических функций в p -, V -, T -переменных | 228 |
| 8.8. Закрытые системы, обменивающиеся энергией с окружающей средой | 234 |
| 8.9. Самопроизвольные процессы | 235 |
| 8.10. Стандарты термодинамики | 240 |
| 8.11. Энтальпия образования химического соединения из простых веществ | 241 |
| 8.12. Термодинамические потенциалы простейших систем | 244 |
| Задачи для самостоятельного решения | 250 |
| <u>Глава 9. Реальные газы. Жидкости</u> | <u>252</u> |
| 9.1. Введение | 252 |
| 9.2. Газ Ван-дер-Ваальса. Состояние равновесия. Процессы | 254 |
| 9.3. Калорические и термические коэффициенты газа Ван-дер-Ваальса | 259 |
| 9.4. Изотермы Ван-дер-Ваальса. Критическая точка | 261 |
| Приложение 9.1. Вириальное уравнение состояния | 266 |
| Приложение 9.2. Жидкости | 267 |
| Приложение 9.3. О воде и ее свойствах | 271 |
| Задачи для самостоятельного решения | 278 |
| <u>Глава 10. Поверхностное натяжение. Капиллярные явления</u> | <u>282</u> |
| 10.1. Фаза | 282 |
| 10.2. Поверхностное натяжение | 282 |
| 10.3. Давление Лапласа. Пузыри и капли | 286 |
| 10.4. Физическая поверхность раздела фаз | 289 |
| 10.5. Смачивание и несмачивание. Капиллярные явления | 292 |
| Приложение 10.1. Поверхностно-активные вещества | 298 |
| Задачи для самостоятельного решения | 302 |
| <u>Глава 11. Фазовые переходы</u> | <u>304</u> |
| 11.1. Введение | 304 |
| 11.2. Классификация фазовых переходов по П. Эренфесту | 306 |
| 11.3. Основные особенности фазовых переходов I рода | 307 |
| 11.4. Условия равновесия фаз | 313 |
| 11.5. Уравнение Клапейрона — Клаузиуса | 317 |
| 11.6. Термодинамические характеристики вдоль кривых фазового равновесия | 321 |

| | |
|---|---------------------|
| 11.7. Изменение энтропии и молярного объема при фазовых переходах I рода | 326 |
| 11.8. Фазовые переходы II рода | 332 |
| Приложение 11.1. Процесс образования водяных паров на T-S- и H-S-диаграммах | 334 |
| Приложение 11.2. О пленочном режиме кипения воды | 337 |
| Приложение 11.3. Термодинамика образования зародышей новой фазы | 337 |
| Приложение 11.4. Конформационные фазовые переходы I рода в биологических структурах | 340 |
| Приложение 11.5. О самопроизвольных процессах самоорганизации в живых организмах | 350 |
| Задачи для самостоятельного решения | 354 |
| Глава 12. Элементы иерархической термодинамики. Растворы. Осмос | 358 |
| 12.1. Введение | 358 |
| 12.2. Идеальный раствор газов | 360 |
| 12.3. Влажность | 363 |
| 12.4. Жидкие растворы | 366 |
| 12.5. Идеальные растворы. Закон Рауля | 367 |
| 12.6. Осмос. Водные растворы | 371 |
| 12.7. Коллигативные свойства растворов | 374 |
| 12.8. Вода — универсальный растворитель | 376 |
| Приложение 12.1. Термодинамический вывод закона Рауля | 378 |
| Приложение 12.2. Адсорбция в поверхностном слое раствора | 379 |
| Приложение 12.3. Полимеры | 381 |
| Задачи для самостоятельного решения | 383 |
| Глава 13. Энтальпия и эффект Джоуля — Томсона | 386 |
| 13.1. Термодинамика ламинарного течения газа по трубе | 386 |
| 13.2. Детандирование и дросселирование | 388 |
| 13.3. Дифференциальный эффект Джоуля — Томсона. Температура инверсии | 389 |
| 13.4. Интегральный эффект Джоуля — Томсона | 393 |
| Задачи для самостоятельного решения | 395 |
| Глава 14. Явления переноса | 397 |
| 14.1. Стационарные процессы переноса | 398 |
| 14.2. Кинетические характеристики процессов переноса в газах | 402 |
| 14.3. Одномерные стационарные процессы переноса в газах | 405 |
| 14.4. Коэффициент вязкости в жидкостях | 408 |
| 14.5. Вакуум | 409 |
| 14.6. Задачи на стационарные процессы переноса | 410 |
| 14.7. Одномерные нестационарные процессы | 425 |
| Задачи для самостоятельного решения | 430 |
| Глава 15. Элементы химической термодинамики. Химические реакции | 433 |
| 15.1. Введение | 433 |
| 15.2. Уравнение химического процесса | 434 |
| 15.3. Тепловой эффект реакции | 436 |
| 15.4. Энтальпия химической реакции | 437 |
| 15.5. Стандартное изменение энергии Гиббса DG° | 438 |
| 15.6. Энтальпия растворения | 442 |
| 15.7. Калориметрические измерения энтальпии. Энтальпия сгорания | 444 |
| 15.8. Энтальпия и потенциал Гиббса как функции температуры и давления | 447 |
| 15.9. Химическое равновесие | 451 |
| Задачи для самостоятельного решения | 457 |
| Справочные материалы | 459 |
| Литература | 462 |
| Алфавитный указатель | 464 |
