

А.Е. ИВАНОВ, С.А. ИВАНОВ

МЕХАНИКА. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

Учебник



МОСКВА
2012

УДК 531(075.8)

ББК 22.2я73

И20

Рецензенты:

Ю. А. Кошмаров, проф. Академии ГПС МЧС России, засл. деятель науки РФ, д-р техн. наук, проф.,

Л. В. Якуш, доц. кафедры физики Московского авиационного института (Государственного технического университета) «МАИ», канд. техн. наук

Иванов А.Е., Иванов С.А.

И20 Механика. Молекулярная физика и термодинамика : учебник / А.Е. Иванов, С.А. Иванов. — М. : КНОРУС, 2012. — 952 с.

ISBN 978-5-406-00525-5

Разработан с учетом происшедших за последние годы изменений во взглядах на преподавание физики; по существу — это новая технология обучения. Каждый раздел включает в себя: основные законы физики, методику решения и решение задач. На большом количестве примеров показано, как следует применять законы физики при решении конкретных задач.

Для студентов технических университетов и преподавателей вузов с расширенной программой по физике. Можно использовать в качестве учебника для вузов с обычной программой, а также для преподавателей и абитуриентов подготовительных отделений технических университетов.

УДК 531(075.8)

ББК 22.2я73

Иванов Анатолий Ефимович

Иванов Сергей Анатольевич

МЕХАНИКА. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

Санитарно-эпидемиологическое заключение

№ 77.99.60.953.Д.006828.04.10 от 28.04.2010 г.

Изд. № 1447. Подписано в печать 11.04.2011. Формат 60×90/16.

Гарнитура «NewtonС». Печать офсетная.

Усл. печ. л. 59,5. Уч.-изд. л. 30,0. Тираж 1000 экз. Заказ №

ООО «КноРус».

129085, Москва, проспект Мира, д. 105, стр. 1.

Тел.: (495) 741-46-28.

E-mail: office@knorus.ru <http://www.knorus.ru>

Отпечатано в ОАО «ТАТМЕДИА».

Полиграфическо-издательский комплекс «Идел-Пресс»

420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Декабристов, д. 2.

ISBN 978-5-406-00525-5

© Иванов А.Е., Иванов С.А., 2012

© ООО «КноРус», 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	9
Введение	10
ЧАСТЬ 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ	15
Глава 1. Основы математического анализа	16
1.1. Система координат. Операции над векторными величинами	16
1.2. Производная и интеграл	19
1.2.1. Функции и их производные	19
1.2.2. Дифференциал	23
1.2.3. Интегралы	25
1.3. Общие методические указания к решению задач	26
Глава 2. Основы кинематики	28
2.1. Основные понятия	28
2.2. Равномерное прямолинейное движение точки. Среднепутевая и средневекторная скорости	28
2.3. Решение задач на равномерное прямолинейное движение	30
2.4. Закон сложения скоростей	45
2.5. Решение задач по закону сложения скоростей	45
2.6. Переменное прямолинейное движение	64
2.7. Решение задач на одномерное движение точки	66
2.8. Движение точки по окружности (одномерное равнопеременное движение)	112
2.9. Решение задач на равномерное вращение точки по окружности	115
2.10. Движение точки по криволинейной траектории (двумерное переменное движение)	119
2.11. Решение задач на двумерное переменное движение	120
Глава 3. Динамика материальной точки	148
3.1. Основные определения	148
3.2. Решение задач по динамике материальной точки при прямолинейном движении	153
3.3. Решение задач динамики материальной точки при движении по окружности	182
Глава 4. Законы изменения и сохранения импульса и механической энергии.	197
4.1. Законы изменения и сохранения импульса	197
4.2. Законы изменения и сохранения механической энергии	201

4.3. Решение задач по законам изменения и сохранения импульса механической энергии	206
--	-----

Глава 5. Вращательное движение твердого тела вокруг неподвижной оси 317

5.1. Динамика вращательного движения твердого тела	317
5.2. Работа и кинетическая энергия при вращательном движении твердого тела	321
5.3. Условия равновесия твердого тела	324
5.4. Решение задач по динамике вращательного движения твердого тела	325
5.5. Вращение твердого тела вокруг свободных осей	361
5.6. Гироскопы	364
5.6.1. Общие понятия	364
5.6.2. Гироскопические силы	366
5.6.3. Прецессия гироскопа	367
5.7. Решение задачи по теории гироскопов	371

Глава 6. Неинерциальные системы отсчета 373

6.1. Силы инерции. Основное уравнение динамики материальной точки в неинерциальных системах отсчета	373
6.2. Сила Кориолиса	375
6.3. Решение задач по динамике материальной точки в неинерциальных системах отсчета	381

Глава 7. Движение тел с переменной массой. Реактивное движение . . . 409

7.1. Основные положения	409
7.2. Законы Кеплера	411
7.3. Основы динамики космических полетов	414
7.4. Решение задач на движение тел с переменной массой	417

Глава 8. Основы гидроаэромеханики 435

8.1. Общие положения	435
8.2. Гидроаэростатика	436
8.3. Решение задач по гидростатике	442
8.4. Гидроаэродинамика	474
8.5. Решение задач по гидроаэродинамике	478
8.6. Вязкость	482
8.7. Ламинарное и турбулентное течения	483
8.8. Течение жидкости в трубе круглого сечения	484
8.9. Потенциальные и вихревые движения	485
8.10. Пограничный слой и явления отрыва	489
8.11. Подъемная сила крыла самолета. Формула Жуковского — Кутта	494
8.12. Эффект Магнуса	497

Глава 9. Механические колебания	499
9.1. Малые колебания	499
9.2. Комплексные числа	502
9.3. Линейные дифференциальные уравнения	505
9.4. Гармонические колебания	508
9.5. Математический маятник	511
9.6. Физический маятник	513
9.7. Графическое изображение гармонических колебаний. Векторная диаграмма	514
9.8. Сложение двух гармонических колебаний одинакового направления и одинаковой частоты	515
9.9. Биения	516
9.10. Сложение двух взаимно перпендикулярных колебаний	517
9.11. Решение задач по кинематике гармонических колебаний	520
9.12. Методика решения задач по динамике гармонических колебаний	527
9.13. Затухающие колебания	585
9.14. Автоколебания	588
9.15. Вынужденные колебания	589
Глава 10. Механические волны. Распространение волн в упругих средах	594
10.1. Основные характеристики волнового движения	594
10.2. Волновое движение в среде. Звук	597
10.2.1. Скорость звука в твердом теле	597
10.2.2. Скорость звука в жидкости и газе	599
10.3. Энергия волн	602
10.4. Отражение одномерной волны. Стоячие волны	603
10.5. Принцип Гюйгенса. Дифракция волн	606
10.6. Эффект Допплера	609
10.7. Решение задач по теории распространения волн в упругих средах	612
Глава 11. Релятивистская механика	618
11.1. Специальная теория относительности	618
11.2. Преобразования Лоренца. Релятивистская кинематика	619
11.3. Относительность расстояний	623
11.4. Относительность промежутков времени	624
11.5. Релятивистский закон сложения скоростей	626
11.6. Основной закон релятивистской динамики материальной точки	627
11.7. Закон взаимосвязи массы и энергии	629
11.8. Решение задач по релятивистской механике	631

ЧАСТЬ 2. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА	637
Глава 12. Молекулярно-кинетическая теория и термодинамика	638
12.1. Определение молекулярно-кинетических и термодинамических методов изучения свойств тел	638
12.2. Основные положения молекулярно-кинетической теории и их экспериментальное обоснование	639
12.2.1. Масса и размеры молекул	639
12.2.2. Основное уравнение молекулярно кинетической теории идеального газа. Закон Дальтона	641
12.2.3. Абсолютная температура — мера средней кинетической энергии молекул	644
12.3. Уравнение состояния идеальных газов	647
12.4. Распределение молекул газа по скоростям	648
12.4.1. Функция распределения	648
12.4.2. Функция распределения Максвелла молекул газа по скоростям	649
12.4.3. Скорости молекул газа: среднеарифметическая, среднеквадратичная и наиболее вероятная	651
12.4.4. Экспериментальная проверка закона распределения Максвелла. Опыт Штерна	653
12.5. Реальные газы. Уравнение Ван-дер-Ваальса	655
12.6. Барометрическая формула	656
12.7. Распределение Больцмана	657
12.8. Определение Перреном числа Авогадро	660
12.9. Решение задач по молекулярно-кинетической теории	662
Глава 13. Термодинамика равновесная	666
13.1. Основные понятия	666
13.2. Нулевое начало термодинамики	666
13.3. Состояние термодинамической системы. Термодинамический процесс	667
13.4. Изопроцессы в газах	669
13.5. Решение задач по термодинамике равновесной идеального газа	671
Глава 14. Физическая кинетика	706
14.1. Средняя длина свободного пробега	706
14.2. Явления переноса в идеальном газе	711
14.2.1. Основные понятия	711
14.2.2. Внутреннее трение	712
14.2.3. Теплопроводность газа	716
14.2.4. Самодиффузия в газах	717
14.2.5. Связь диффузии с подвижностью частицы	719
14.3. Явления в разреженных газах	720
14.4. Решение задач по физической кинетике	722

Глава 15. Первое начало (закон) термодинамики	730
15.1. Внутренняя энергия идеального газа. Количество теплоты. Работа в термодинамике	730
15.2. Первое начало (закон) термодинамики	733
15.3. Теплоемкость. Первое начало термодинамики и теплоемкости идеального газа для различных изопроцессов	734
15.4. Адиабатный процесс	736
15.4.1. Уравнение адиабаты идеального газа (уравнение Пуассона)	736
15.4.2. Работа идеального газа в адиабатном процессе	739
15.5. Политропные процессы	739
15.6. Работа, совершаемая идеальным газом при расширении в различных процессах	741
15.7. Решение задач по термодинамике идеального газа	743
Глава 16. Второе и третье начала термодинамики	794
16.1. Основные понятия и определения	794
16.2. Термодинамический цикл Карно	798
16.3. Второе начало термодинамики	800
16.4. Третье начало термодинамики	803
16.5. Термодинамические потенциалы	808
16.6. Применение термодинамических потенциалов для описания эффекта Джоуля — Томсона	812
16.7. Принцип Ле Шателье — Брауна	818
16.8. Введение в термодинамику необратимых процессов	819
16.9. Решение задач по второму началу термодинамики	822
Глава 17. Агрегатные состояния и фазы вещества. Твердое тело	855
17.1. Молекулярные силы	855
17.2. Агрегатные состояния и фазы вещества	858
17.3. Твердые тела	860
17.3.1. Строение твердых тел. Кристаллы	860
17.3.2. Типы кристаллов	861
17.3.3. Теплоемкость твердых тел	863
17.3.4. Тепловое расширение твердых и жидких тел	863
17.3.5. Виды деформаций твердых тел	865
17.3.6. Механические свойства твердых тел	866
17.4. Решение задач по термодинамике твердого тела	869
Глава 18. Жидкое состояние	880
18.1. Строение жидкости	880
18.2. Поверхностное натяжение	881
18.3. Давление под изогнутой поверхностью жидкости	884
18.4. Явления на границе раздела газа, жидкости и твердого тела	886

18.5. Капиллярные явления	887
18.6. Решение задач по теории поверхностного натяжения	888
Глава 19. Фазовые переходы. Диаграмма состояний вещества	914
19.1. Основные понятия	914
19.2. p, T -диаграммы состояния вещества. Фазовые переходы	919
19.3. Решение задач по теории фазовых переходов	920
Литература	950

ПРЕДИСЛОВИЕ

Знание законов физики предполагает умение не только формулировать эти законы, но и применять их в конкретных случаях при решении задач. Однако именно решение задач вызывает наибольшие затруднения у изучающих физику.

Для решения задач оказывается, как правило, недостаточно формального знания физических законов. В некоторых случаях необходимо знание специальных методов, приемов, общих для решения определенных групп задач. В других случаях таких методов не существует. Тогда главным, что способствует успеху дела (кроме знания теории), становится способность к аналитическому мышлению, т. е. умение рассуждать.

Этим двум аспектам обучения решению задач на семинарских занятиях не всегда уделяют должное внимание.

Настоящий учебник имеет целью восполнить указанный пробел, он является самодостаточным: в нем приводятся основные законы физики и решения задач по каждому разделу. Цель этой книги — сосредоточить внимание читателей на основных законах механики, молекулярной физики и термодинамики, а также показать, как следует применять эти законы при решении задач.

Книга содержит две части: 1) механика; 2) молекулярная физика и термодинамика.

В каждой главе сначала излагаются соответствующие законы физики, а затем на ряде весьма интересных с точки зрения физики примеров и задач показывается, как следует подходить к их решению. Задачи тесно связаны с основным текстом, являются его развитием и дополнением, поэтому работа над ними не менее важна, чем изучение основного текста.

Учебник рассчитан в основном на студентов первых курсов технических университетов с расширенной программой по курсу общей физики. Он может быть полезен и студентам старших курсов, а также преподавателям вузов.

Учебник разбит на 19 глав, соответствующих делению курса механики, молекулярной физики и термодинамики на основные разделы. Вначале даются общие методические указания к решению задач механики. Каждая глава начинается с разбора соответствующих законов с конкретизацией основных пунктов методических указаний. Особое внимание уделяется построению схематического чертежа (нанесение на чертеж всех векторных и скалярных величин условия задачи; если между соприкасающимися поверхностями тел нет трения, между ними ставится зазор и т.д.). После теории данной главы представлены решения более 500 задач с лаконичными пояснениями. Правильность решения задач в общем (буквенном) виде определяется нахождением единицы искомой физической величины.

ВВЕДЕНИЕ

Физика — наука о наиболее общих свойствах и формах движения материи. В настоящее время известны два вида материи: вещество и поле. К первому виду материи, веществу, относятся, например, атомы, молекулы и все построенные из них тела. Второй вид материи образуют гравитационные, электромагнитные и другие поля.

Материя находится в непрерывном движении, под которым понимается всякое изменение вообще. Движение представляет собой неотъемлемое свойство материи, которое несотворимо и неуничтожимо, как и сама материя.

Физические законы устанавливаются на основе обобщения опытных фактов и выражают объективные закономерности, существующие в природе. Основным методом исследования в физике является опыт, т. е. наблюдение исследуемого явления в точно контролируемых условиях, позволяющих следить за ходом явления и воссоздавать его каждый раз при повторении этих условий.

Для объяснения опытных данных привлекаются гипотезы. Гипотеза — научное предположение, выдвигаемое для объяснения явления и требующее проверки. Успешно проверенная экспериментально гипотеза превращается в научный закон или теорию.

Физическая теория представляет собой систему основных идей, обобщающих опытные данные и отражающих объективные закономерности природы.

Механика — раздел физики, в котором изучают простейшую форму движения материи — механическое движение. *Механическое движение* — изменение взаимного расположения тел в пространстве, их размеров и формы с течением времени. Механическое движение относительно. Тело, относительно которого рассматривают перемещения других тел, называется телом отсчета. Тело отсчета, связанные с ним система координат и часы называют *системой отсчета*.

Механику подразделяют на три части: кинематику, динамику и статику. Кинематика описывает механическое движение вне зависимости от действующих сил, от движущихся масс. В динамике изучаются законы движения тел в связи с действующими силами. Статика изучает условия равновесия тел под действием сил.

Перед изучением механики необходимо сделать несколько кратких общих замечаний, относящихся к предмету физики и методам физических исследований, а также привести определения некоторых основных понятий.

Физическое явление — совокупность закономерно связанных изменений, происходящих с телами во времени.

Физический опыт — наблюдение физических явлений как в их естественном виде, так и в условиях лабораторных опытов.

Физическая величина — характеристика одного из свойств физического объекта (физической системы, явления или процесса), общая в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальная для каждого из них

Измерение физической величины — последовательность операций для определения ее значения. При этом измеряемую физическую величину *сравнивают* с определенной величиной такого же рода, принятой за единицу.

Единица физической величины может быть задана указанием *этало́на* — физического объекта, количественная характеристика которого по соглашению принята за единицу.

Абстракции и упрощения. При анализе сложных процессов стараются отделить *главные* закономерности и связи от *второстепенных*, создавая тем самым некоторую условную *схему* явления, пользуясь научными *абстракциями*. Абстракции — это такие понятия, которые отображают только некоторые определенные свойства предметов или некоторые определенные характеристики процесса. Например, в механике абстракцией является *материальная точка*.

Материальная точка — модель тела, применяемая в механике для описания движения в случаях, когда размерами тела в условиях данной задачи можно пренебречь:

1) размер данного тела l намного меньше минимального расстояния до других тел L ($l \ll L$);

2) тело движется поступательно¹;

3) тело сферически симметричное, однородное (однородный шар).

Одно и то же тело в одних случаях можно рассматривать как материальную точку, в других же — как протяженное тело.

Положение материальной точки в пространстве изображается геометрической точкой.

Механической характеристикой материальной точки является ее *масса*.

Абсолютно твердое тело — модель тела, применяемая в случаях, когда изменением формы и размеров тела при его движении мож-

¹ Поступательное движение — движение, при котором прямая, мысленно проведенная через две любые точки тела, остается параллельной первоначальному положению, или движение, при котором скорости всех точек тела в данный момент времени одинаковы.

но пренебречь; абсолютно твердое тело можно также рассматривать как систему материальных точек, расстояния между которыми остаются неизменными.

Физические законы выражаются в виде математических соотношений между физическими величинами. С помощью физических законов величины могут быть объединены в систему, в которой одни физические величины — *основные* — принимаются за независимые, а другие — *производные* — являются функциями независимых величин.

В физике применяется введенная в 1960 г. XI Генеральной конференцией по мерам и весам Международная система единиц физических величин (сокращенное название SI, что означает Systeme International d'Unitees, или в русской транскрипции — СИ).

Основными единицами СИ в механике являются: единица длины — метр (м), единица массы — килограмм (кг), единица времени — секунда (с).

Дополнительными единицами СИ являются две единицы: единица плоского угла — радиан (рад) и единица телесного угла — стерadian (ср).

Международная система единиц (СИ) устанавливает в качестве основных семь величин, которые приведены в табл. 1.

Таблица 1

Единицы основных физических величин в СИ

№№ п/п	Величина	Размер- ность	Единица	Обозначение единицы
1	Длина	L	метр	м
2	Масса	M	килограмм	кг
3	Время	T	секунда	с
4	Сила тока	I	ампер	А
5	Температура термодинами- ческая	Θ	кельвин	К
6	Сила света	J	кандела	кд
7	Количество вещества	N	моль	моль

Международная система единиц является универсальной: семь ее основных единиц позволяют образовывать единицы для любых физических величин.

Единица физических величин обозначается квадратными скобками, например единица длины $[L] = \text{м}$, которая читается так: «Единица длины равна метру».

Производные единицы СИ — единицы всех остальных физических величин. Они образуются с помощью математических выражений фи-

зических законов из основных и дополнительных единиц. Так, например, единица силы — ньютон — является производной единицей. Она образована из одной основной единицы (килограмм) и одной производной (метр на секунду в квадрате) с помощью определяющего уравнения (второго закона Ньютона):

$$F = ma.$$

Подставив в это уравнение единицы СИ $[m] = \text{кг}$ и $[a] = \text{м/с}^2$, получим единицу силы — ньютон:

$$[F] = [m] \cdot [a] = \text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}^2} = \text{Н}.$$

Размерность физической величины — выражение в форме степенного одночлена, составленного из произведений символов основных физических величин в различных степенях, отражающее связь данной физической величины с основными величинами системы единиц. В СИ для основных единиц механики приняты следующие размерности: длины — L , массы — M , времени — T .

Показателем размерности физической величины называется показатель степени, в которую возведена размерность основной величины, входящая в размерность производной величины. Над размерностями величин можно производить действия умножения, деления, возведения в степень и извлечение корня.

Размерность величины X обозначается: $\dim X$ (\dim — сокращение от латинского слова *dimensio* — измерение¹).

Размерной физической величиной называется величина, в размерности которой хотя бы один из показателей размерности не равен нулю. Например, размерность силы

$$\dim F = \dim m \cdot \dim a = LMT^{-2}.$$

Безразмерной физической величиной называется величина, в размерности которой все показатели степени равны нулю. Например, относительное удлинение

$$\dim \varepsilon = \frac{\dim \Delta L}{\dim L} = \frac{L}{L} = 1.$$

При решении задач все величины выражают в единицах СИ, поэтому правильность полученного в общем виде ответа рекомендуется

¹ Необходимо строго различать понятия «размерность» и «единица» физической величины. Часто единицу физической величины ошибочно называют размерностью. Размерность, например, силы LMT^{-2} путают с единицей силы Н (ньютоном).

проверять следующим образом: в правую часть формулы нужно вместо буквенных обозначений физических величин подставить единицы измерения этих величин и произвести с ними необходимые действия; в результате должно получиться обозначение единицы измерения искомой величины. Если оно не получилось, то это означает, что задача решена неверно.

Пусть, например, решением задачи является мощность, выраженная в общем виде формулой

$$P = \rho V_t \left(\frac{V_t^2}{2s^2} + gh \right),$$

где P — мощность, Вт; ρ — плотность жидкости, кг/м³; V_t — объемный расход жидкости, м³/с; s — площадь, м²; g — ускорение свободного падения, м/с²; h — высота, м.

Если в правой части формулы имеется алгебраическая сумма, то нужно сначала проверить, одинаково ли выражаются через обозначения единиц слагаемые. Если одинаково, то соответствующее выражение надо подставить в формулу вместо суммы, а затем производить алгебраические действия.

Проверим сначала каждое слагаемое:

$$\left[\frac{V_t^2}{2s^2} \right] = \frac{\left(\frac{\text{м}^3}{\text{с}} \right)^2}{(\text{м}^2)^2} = \frac{\text{м}^6}{\text{с}^2 \cdot \text{м}^4} = \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}. \quad [gh] = \frac{\text{м} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} = \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}.$$

Слагаемые выражаются одинаково, т.е. они выражаются одной единицей. Следовательно,

$$[P] = [\rho V_t] \cdot \left[\left(\frac{V_t^2}{2s^2} + gh \right) \right] = \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \cdot \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^3} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{с}} = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = \text{Вт}.$$

Получили единицу мощности, соответствующую искомой физической величине. Вывод: задача решена верно.