

**Бармасов А. В.  
Холмогоров В. Е.**

**Курс общей физики  
для природопользователей**

# **Механика**

**под ред. А. С. Чирцова**

Допущено Научно-методическим советом по физике  
Министерства образования и науки Российской Федерации  
в качестве учебного пособия для студентов вузов, обучающихся  
по естественно-научным и техническим направлениям и специальностям

Санкт-Петербург

«БХВ-Петербург»

2008

**Бармасов, А. В.**

Б24 Курс общей физики для природопользователей. Механика : учеб. пособие / А. В. Бармасов, В. Е. Холмогоров / Под ред. А. С. Чирцова. — СПб.: БХВ-Петербург, 2008. — 416 с.: ил. — (Учебная литература для вузов)

ISBN 978-5-94157-729-3

Книга является первой из серии книг полного курса общей физики для природопользователей и представляет собой расширенный адаптированный лекционный курс. Важной особенностью книги является сочетание фундаментальности и профилизации в рамках ограниченного числа лекционных часов. Профилизация курса заключается в выборе приоритетов и в иллюстрациях применения физики в геологии, биологии, почвоведении и экологии, что создает основу для изучения спецкурсов.

В книге изложены основные разделы механики: системы единиц, кинематика, динамика материальной точки, основы небесной механики, теории тяготения, теории упругости, гравиметрия, трение, элементы гидродинамики, неинерциальные системы отсчета, работа, энергия, законы сохранения, основы механики твердого тела и релятивистской механики.

Приводятся вопросы для самопроверки.

*Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по естественно-научным направлениям подготовки*

УДК 530.1(075.8)  
ББК 22.3я73

**Группа подготовки издания:**

Главный редактор	<i>Екатерина Кондукова</i>
Зам. главного редактора	<i>Татьяна Лапина</i>
Зав. редакцией	<i>Григорий Добин</i>
Редактор	<i>Алексей Семенов</i>
Компьютерная верстка	<i>Ольги Сергиенко</i>
Корректор	<i>Зинаида Дмитриева</i>
Дизайн серии	<i>Инны Тачиной</i>
Зав. производством	<i>Николай Тверских</i>

Лицензия ИД № 02429 от 24.07.00. Подписано в печать 20.12.07.

Формат 70×100<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Печать офсетная. Усл. печ. л. 33,54.

Тираж 2000 экз. Заказ №

"БХВ-Петербург", 194354, Санкт-Петербург, ул. Есенина, 5Б.

Санитарно-эпидемиологическое заключение на продукцию № 77.99.02.953.Д.006421.11.04 от 11.11.2004 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека.

Отпечатано с готовых диапозитивов  
в ГУП "Типография "Наука"  
199034, Санкт-Петербург, 9 линия, 12

# Оглавление

<b>Предисловие .....</b>	<b>7</b>
<b>Введение .....</b>	<b>13</b>
<b>Основные термины и обозначения.....</b>	<b>27</b>
<b>Глава 1. Системы единиц .....</b>	<b>31</b>
1.1. Механика. Исторический очерк развития основных идей и взглядов.....	31
1.1.1. Предмет и структура современной механики.....	34
1.2. Материальная точка.....	35
1.3. Пространство и время.....	36
1.4. Физические измерения. Размерность .....	37
1.4.1. Время.....	38
1.4.2. Длина.....	39
1.5. Системы единиц .....	42
1.6. Скалярные и векторные величины .....	47
1.6.1. Законы сложения и вычитания векторов .....	50
1.7. Умножение вектора на скаляр .....	52
1.7.1. Законы умножения вектора на скаляр.....	52
1.8. Произведение векторов. Двойные произведения .....	53
1.8.1. Законы скалярного и векторного умножения векторов.....	53
<b>Глава 2. Кинематика .....</b>	<b>57</b>
2.1. Кинематика материальной точки.....	57
2.2. Системы координат.....	57
2.3. Системы отсчета .....	61
2.4. Движение в механике .....	61
2.5. Траектория, путь .....	62
2.6. Перемещение .....	63

2.7. Скорость .....	65
2.8. Ускорение .....	71
2.9. Равноускоренное поступательное движение .....	71
2.10. Криволинейное движение .....	77
2.11. Нормальное и тангенциальное ускорения .....	78
2.12. Угловая скорость, угловое ускорение .....	79

### **Глава 3. Динамика материальной точки ..... 85**

3.1. Инерциальные системы отсчета .....	85
3.2. Принцип инерции, принципы относительности.....	87
3.3. Первый закон Ньютона.....	89
3.4. Сила.....	91
3.5. Основные силы в физике.....	95
3.6. Второй закон Ньютона .....	96
3.7. Масса.....	97
3.8. Импульс .....	100
3.9. Третий закон Ньютона.....	101
3.10. Закон сохранения импульса .....	104

### **Глава 4. Основы небесной механики. Основы теории тяготения..... 107**

4.1. Законы Кеплера.....	107
4.2. Солнечная система.....	111
4.3. Закон всемирного тяготения. Гравитационные силы .....	124
4.4. Гравитационная и инертная массы, их эквивалентность.....	132
4.5. Черные дыры .....	134

### **Глава 5. Гравитационное поле Земли. Гравиметрия..... 139**

5.1. Гравитационное поле Земли.....	139
5.2. Сила тяжести .....	142
5.3. Вес .....	149
5.4. Невесомость .....	152
5.5. Космические скорости.....	154
5.6. Космические исследования .....	158
5.7. Геоид .....	161
5.8. Потенциал гравитационного поля .....	163
5.9. Аномалии ускорения силы тяжести.....	166
5.10. Принципы гравиразведки .....	170

### **Глава 6. Основы теории упругости. Трение. Элементы гидродинамики ..... 175**

6.1. Упругие силы, деформации.....	175
6.2. Растяжение, сжатие, сдвиг .....	179
6.3. Закон Гука.....	185
6.4. Модули Юнга и сдвига .....	187

6.5. Силы трения покоя, скольжения и качения .....	193
6.6. Гидродинамика.....	196
6.7. Уравнение Бернулли .....	198
6.8. Вязкое трение; вязкость.....	204
6.9. Число Рейнольдса .....	209
6.10. Закон Стокса.....	209
6.11. Элементы гидрогеодинамики.....	214

## **Глава 7. Неинерциальные системы отсчета. Движение тела с переменной массой.....219**

7.1. Неинерциальные системы отсчета. Силы инерции .....	219
7.2. Перегрузки.....	221
7.3. Центробежная сила инерции.....	225
7.4. Зависимость веса тела от широты местности.....	227
7.5. Центрифуги и их применение в научных исследованиях .....	230
7.6. Сила Кориолиса.....	231
7.7. Реактивное движение; движение тела с переменной массой. Формула Циолковского. Уравнение Мещерского .....	236

## **Глава 8. Работа. Мощность. Энергия. Закон сохранения и превращения энергии .....245**

8.1. Работа силы .....	245
8.2. Мощность .....	248
8.3. Энергия .....	249
8.4. Кинетическая и потенциальная энергии .....	251
8.5. Консервативные силы.....	255
8.6. Энергия сжатой или растянутой пружины.....	256
8.7. Закон сохранения и превращения энергии .....	257
8.8. Центральный удар. Упругое и неупругое соударения двух тел.....	260
8.9. Деформации горных пород и закон сохранения и превращения энергии.....	263

## **Глава 9. Основы механики твердого тела.....269**

9.1. Абсолютно твердое тело. Центр масс тела .....	269
9.2. Поступательное, вращательное и плоское движение.....	270
9.3. Вращательное движение абсолютно твердого тела вокруг неподвижной оси ....	273
9.4. Законы сохранения при вращательном движении .....	278
9.5. Теорема Гюйгенса—Штейнера.....	281
9.6. Гироскоп .....	284

## **Глава 10. Основы релятивистской механики .....291**

10.1. Специальная теория относительности .....	291
10.2. Движение тел с околосветовой скоростью. Преобразования Лоренца .....	298
10.3. Понятие одновременности .....	300
10.4. Релятивистское сокращение продольных размеров тела .....	301

10.5. Релятивистское замедление времени .....	302
10.6. Релятивистский закон преобразования скорости .....	307
10.7. Парадокс близнецов.....	307
10.8. Релятивистский интервал .....	308
10.9. Релятивистская масса. Релятивистский импульс. Кинетическая энергия релятивистской частицы .....	309
10.10. Взаимосвязь энергии и массы .....	312
10.11. Связь между полной энергией и импульсом релятивистской частицы .....	314

**ПРИЛОЖЕНИЯ .....317**

**Приложение 1. Справочные данные .....319**

**Приложение 2. Словарь терминов, используемых в механике .....323**

**Приложение 3. Историческая справка .....363**

**Приложение 4. Краткие биографические справки.....367**

**Литература .....387**

**Дополнительная литература.....391**

**Предметный указатель .....405**

# Предисловие

Трудных наук нет, есть только трудные изложения.

*А. И. Герцен<sup>1</sup>*

Предлагаемый курс физики написан на основе лекций, разработанных А. В. Бармасовым и В. Е. Холмогоровым и читаемых авторами на протяжении многих лет в Санкт-Петербургском государственном университете. В книге учтены замечания и пожелания студентов биолого-почвенного факультета, геологического факультета и факультета географии и геоэкологии Санкт-Петербургского государственного университета, факультета экологии и физики природной среды Российского государственного гидрометеорологического университета.

Данное пособие представляет собой интегрированный учебник для студентов и бакалаврантов всех форм обучения нефизических направлений и специальностей вузов: "Биология", "Геология", "Гидрометеорология", "Почвоведение", "Природопользование", "Экология и природопользование", "Геология и геохимия горючих полезных ископаемых", "Геофизика", "Геохимия", "Геоэкология", "Гидрогеология, грунтоведение и инженерная геология", "Гидрология", "Метеорология", "Океанология", "Прикладная геохимия, минералогия, петрология", "Экологическая геология", "Экология" и близким к ним. Пособие может быть использовано студентами и преподавателями вузов и техникумов, полезно учащимся лицеев и колледжей, а также абитуриентам, готовящимся к поступлению в вузы.

По мнению авторов, курс общей физики для нефизических специальностей вузов должен быть не только фундаментальным, но и профилизованным. Профилизация при этом заключается в первую очередь в выборе приоритетов

---

<sup>1</sup> Герцен Александр Иванович (1812—1870 гг.) — русский революционер, писатель, философ.

и в иллюстрациях применения физики в геологии, биологии, почвоведении и экологии. Профилизация является не только мотивацией для студентов в изучении физики, но и основой в изучении будущих спецкурсов. Сочетание фундаментализации и профилизации в рамках ограниченности лекционных часов — одна из особенностей данного курса. Авторы стремились изложить общую физику не как набор формул, а как логичную науку, знание которой требует не столько памяти, сколько рассуждений. С целью приближения "теоретической" науки к повседневной жизни в курсе даны примеры, которые могут вызвать особый интерес читателя.

Данный учебник написан с учетом высказанных еще в 1945 г. выдающимся российским физиком Яковом Ильичом Френкелем (1894—1952 гг.) идей о преподавании физики в вузах, основанных на его собственном гигантском опыте ученого, профессора высшей школы и автора фундаментальных учебных пособий<sup>1</sup>. Распространенный взгляд о том, *"что студент может овладеть преподаваемой дисциплиной, не заглядывая ни в одну книгу, является совершенно неприемлемым, — писал Френкель. — Это привело бы к ничем не оправданной затрате преподавателем времени — при наличии хорошего печатного курса, апробированного или составленного им (преподаватель чаще всего излагает своим слушателям один и тот же материал из года в год, а иногда и по несколько раз в один и тот же год — для разных потоков). Это также вызвало бы нерациональную затрату времени студентами, вынужденными в течение многих месяцев посещать лекции даже в том случае, если они имеют возможность ознакомиться с излагаемым материалом по книге в несравненно более короткое время... Роль профессоров и преподавателей заключается в первую очередь в организации консультаций (групповых и индивидуальных), на которых дискуссия по трудным вопросам курса, возникающая в процессе консультации, может перерасти и в лекцию"*. Авторы данного учебника считают данный подход заслуживающим внимания, и при написании учебника стремились создать пособие именно для такого подхода к преподаванию физики.

Отличительной чертой пособия является то, что оно, не повторяя ни один из существующих на данный момент учебников, представляет собой в целом расширенный адаптированный лекционный курс. Вместе с тем, авторы не считают необходимым в очередной раз повторять в этом пособии отдельные материалы, широко доступные в учебной и специальной литературе. В конце важнейших разделов приводятся вопросы для самопроверки.

---

<sup>1</sup> Френкель Я. И. Система преподавания в вузах требует пересмотра. — Вестник высшей школы, 1945, № 4, с. 35.

Хоть авторы и стремились в данном курсе полностью осветить все важнейшие понятия общей физики и необходимые математические термины, все же предполагается предварительное знакомство читателя с элементарной физикой и математикой, что позволяет авторам использовать в тексте пособия еще не рассмотренные (на данном этапе изложения материала) понятия и термины.

Особенностью является и то, что наиболее важные итоговые выводы специальным образом выделены в тексте лекций. Для удобства читателей используется сквозная нумерация всех уравнений, рисунков, таблиц и литературы, а также широкое использование ссылок на разделы глав и на другие тома курса<sup>1</sup>. Материал излагается с использованием простых математических выкладок и с учетом уровня преподавания физики и математики на нефизических специальностях вузов, некоторые наиболее важные положения рассматриваются с разных точек зрения и приводятся в разных разделах курса.

Необходимо также отметить большое количество справочного материала, которое позволяет использовать данное пособие в качестве справочника при изучении теоретического материала, выполнении лабораторных работ и решении задач.

Особенностью пособия является и наличие списка принятых в данном издании терминов и обозначений, а в приложениях — справочных данных и словаря терминов (на русском и английском языках), используемых в данном разделе физики. В словаре приводятся краткие толкования основных понятий, терминов, формулировок законов и т. п., по возможности без использования математических формул. Приводимые толкования, как правило, не повторяют дословно, а скорее дополняют приводимые в тексте учебника определения. Статьи словаря представлены в алфавитном порядке.

Курс соответствует требованиям, предъявляемым Государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования Российской Федерации. Структура учебного пособия определяется рекомендуемым объемом лекций по данному предмету на нефизических специальностях вузов. Как следствие — разделение излагаемого материала на главы и возможный краткий повтор некоторых изложенных ранее материалов. Распределение материала по главам выбрано с учетом опыта преподавания этого курса.

В издании максимально возможно учтены рекомендации Международной организации по стандартизации, Международной электротехнической комис-

---

<sup>1</sup> Во всех томах этого курса, а также в других пособиях данных авторов использован единый стиль терминологии, оформления и изложения материала.

сии, Международного союза теоретической и прикладной физики, Международного союза теоретической и прикладной химии, Международной комиссии по освещению и XI Генеральной конференции по мерам и весам по вопросам терминологии, системы единиц СИ и обозначений. Кроме того, по возможности учтены рекомендации ГОСТа 8.04-72 "Показатели точности измерений и формы представления результатов измерений" и ГОСТа 16263-70 "Метрология. Термины и определения". Вместе с тем в отдельных случаях приводятся и устаревшие, но все еще широко применяемые на практике единицы, термины и обозначения.

При первом упоминании в тексте авторов тех или иных научных открытий приводятся полные инициалы, а в скобках — оригинальное написание фамилии и годы жизни. В разделе "Приложения" приведена краткая хронология истории развития данного раздела физики, а также краткие биографические справки.

В качестве задачников, в частности, можно рекомендовать:

☞ *Бобровский А. П., Бармасов А. В., Бармасова А. М., Логинов А. В., Белов М. М., Косцов В. В., Яковлева Т. Ю.* Контрольная работа по дисциплине "Физика". Раздел "Вращение твердого тела" / Ответственный редактор *А. В. Логинов.* — СПб.: Изд-во РГГМУ, 2006. — 20 с.

☞ *Яковлева Т. Ю., Бармасов А. В., Бармасова А. М., Белов М. М., Бобровский А. П., Косцов В. В., Недзвецкая И. В., Скобликова А. Л.* Контрольная работа по дисциплине "Физика". Раздел "Основы специальной теории относительности" / Ответственный редактор *А. В. Логинов.* — СПб.: Изд-во РГГМУ, 2007. — 50 с.

Основной курс общей физики для природопользователей состоит из следующих томов:

- ☐ механика с основами небесной механики и релятивистской механики;
- ☐ колебания и волны;
- ☐ молекулярная физика и термодинамика;
- ☐ электричество;
- ☐ магнетизм и электромагнитные явления;
- ☐ оптика и квантовая физика;
- ☐ атомная и ядерная физика.

Авторы признательны Анне Михайловне Бармасовой, Валентину Ивановичу Короткову и Станиславу Владимировичу Ащеулову за целый ряд ценных

советов и замечаний, которые были учтены при окончательной доработке книги.

Авторы приносят искреннюю благодарность рецензентам пособия, а также главному редактору издательства "БХВ-Петербург" Екатерине Владимировне Кондуковой и научному редактору Алексею Николаевичу Семенову.

Комментарии, отзывы и заказы просим посылать по электронной почте: [barmasov@pobox.spbu.ru](mailto:barmasov@pobox.spbu.ru).

*Авторы*



# Введение

Я осмелюсь утверждать, что из всех знаний наиболее полезно для нас знание природы, ее законов.

*Ж. Б. Ламарк<sup>1</sup>*

Все науки можно разделить на две группы — на физику и коллекционирование марок.

*Э. Резерфорд<sup>2</sup>*

"Физика" — слово древнегреческого происхождения. В переводе на русский язык φυσική (physis) означает "природа".

Знаменитый греческий мыслитель древности — ученик Платона (427—347 гг. до н. э.), наставник Александра Македонского (Ἀλέξανδρος Γόργιος, 356—323 гг. до н. э.) Аристотель (Ἀριστοτέλης, 384—322 гг. до н. э.) является "крестным отцом" физической науки. Название его книги, посвященной философскому исследованию природы, — "Физика", стало названием науки о природе. Еще древнегреческий философ-материалист Эпикур (341—270 гг. до н. э.) делил философию на физику (учение о природе), следуя атомистике древнегреческого философа Демокрита (около 470 или 460 г. до н. э.), канонику (учение о познании) и этику. Древние называли физикой любое исследование окружающего мира и явлений природы. Такое понимание термина "физика" сохранялось до конца XVII в.

**Физика** — наука, изучающая наиболее общие закономерности природы, строение и законы движения материи. Физика является точной наукой. Границы, разделяющие физику и другие естественные науки, исторически условны. Физические законы обычно представляются в виде количественных соотношений, выраженных на языке математики.

---

<sup>1</sup> Жан Батист Ламарк (Lamarck, 1744—1829 гг.) — французский естествоиспытатель, создатель первой целостной эволюционной теории.

<sup>2</sup> Эрнест Резерфорд (Baron Ernest Rutherford, 1871—1937 гг.) — английский физик.

Физика выросла из потребностей практики, и в дальнейшем ее развитие часто стимулировалось практическими требованиями. Зачастую фундаментальные физические открытия находили свое применение через много лет.

Френкель разделял науки о природе на две категории. Первые из них имеют своей целью познание природы, а средством получения знаний — воздействие на природу (эксперимент<sup>1</sup>). Эти науки Френкель называл теоретическими и противопоставлял им науки практические, или технические, цель которых — воздействие на природу, осуществляемое во всеоружии знаний (природопользование). Френкель писал: *"Таким образом, теоретические и практические науки опираются друг на друга; теоретические открытия влекут за собой технические изобретения, а последние, в свою очередь, делают возможным новые открытия; трофеями ученого пользуется техник для покорения природы; трофеями техника — ученый для ее познания"*.

Российский физик Абрам Федорович Иоффе (1880—1960 гг.) определил физику как науку, изучающую общие свойства и законы движения вещества и поля. В настоящее время общепризнано, что все взаимодействия осуществляются посредством *полей*. Поле наряду с веществом является одной из форм существования материи.

Более детально физическую форму движения материи, изучаемую физикой, можно подразделить на механическую, молекулярно-тепловую, электромагнитную, оптическую, атомную и ядерную. Естественно, что такое деление условно. Тем не менее, физику как учебную дисциплину обычно представляют именно такими разделами.

Структура физики сложна. Различают экспериментальную физику (опыты, проводимые для обнаружения новых фактов, проверки гипотез и открытых физических законов) и теоретическую физику, цель которой состоит в формулировании общих законов природы и в объяснении конкретных явлений на основе этих законов, а также предсказании новых явлений. В зависимости от изучаемых объектов выделяют физику элементарных частиц, физику ядра, физику атомов и молекул, физику газов и жидкостей, физику плазмы, физику твердого тела. В зависимости от изучаемых процессов или форм движения материи выделяют механику материальных точек и твердых тел, механику сплошных сред (включая акустику и гидродинамику), термодинамику и статистическую механику, электродинамику (включая оптику), теорию тяготения, квантовую механику и квантовую теорию поля. Принято выделять также учение о колебаниях и волнах, рассматривающее механические, акустические, электрические и оптические колебания и волны под единым углом зрения. В основе физики лежат фундаментальные физические принципы и тео-

---

<sup>1</sup> **Эксперимент** (от лат. *experimentum* — проба, опыт) — метод познания, при помощи которого в контролируемых и управляемых условиях исследуются явления природы.

рии, которые охватывают все разделы физики и наиболее полно отражают суть физических явлений.

Физика использует различные методы исследования, но все они соответствуют единству теории и практики и отражают общий научный подход к познанию окружающей действительности: наблюдение, размышление, опыт. На основе наблюдений формулируются гипотезы и законы, создаются теории, они проверяются и используются на практике.

Физика — не только экспериментальная, но и теоретическая наука, язык физики — математика. Над входом в "Академию Платона" была надпись: "Пусть не входит никто, не знающий математики". Математика играет двоякую роль — она не только обеспечивает физику вычислительным аппаратом, но и формирует ее понятия. Математические понятия отражают суть физических идей: без математического понятия производной нет физического понятия скорости; без дифференциальных уравнений нет законов движения классической механики; без операторных уравнений нет квантовой физики.



---

Физика — наука о природе, о наиболее простых общих свойствах материи.

---

Физику весьма условно можно подразделить на 3 большие области: физику движения, физику взаимодействий и структурную физику.

**Физика движения (механика)** включает в себя классическую механику, релятивистскую механику, нерелятивистскую квантовую механику и релятивистскую квантовую механику.

**Физика взаимодействий**, основанная на представлении о *поле*, как материальном носителе взаимодействия, делится на 4 группы (сильное, электромагнитное, слабое, гравитационное).

Науки, образующие **структурную физику**, довольно четко различаются по изучаемым объектам, которыми могут быть как элементы структуры вещества (элементарные частицы, атомы, молекулы), так и более сложные образования (плазма, кристаллы, звезды и т. п.).

В недрах греческой натурфилософии сформировались зародыши всех трех частей физики, однако на первом плане стояла физика движения, понимаемого как изменение вообще. Подобное рассмотрение проблем, связанных с анализом движения как перемещения в пространстве, впервые было осуществлено Зенóном Элейским (около 490—430 гг. до н. э.). В связи с обсуждением структуры первоначал зарождаются и конкурируют концепции непрерывной делимости до бесконечности (Анаксагóр из Клазомен (Αναξαγόρας, около 500—428 гг. до н. э.)) и дискретности существования неделимых элементов (атомисты).

Рассматривая развитие физики, директор Европейского центра ядерных исследований, американский физик-теоретик Виктор Фредерик Вайскопф (Weisskopf, 1908—2002 гг.) как-то заметил, что путь, которым следует наука в XX в., определился примерно пятьсот лет назад, когда ученые *"вместо того, чтобы устанавливать сразу всю истину и объяснять целиком Вселенную"*, попытались *"найти отдельные истины малого масштаба, касающиеся некоторых поддающихся определению и должным образом выделенных групп явлений"*.

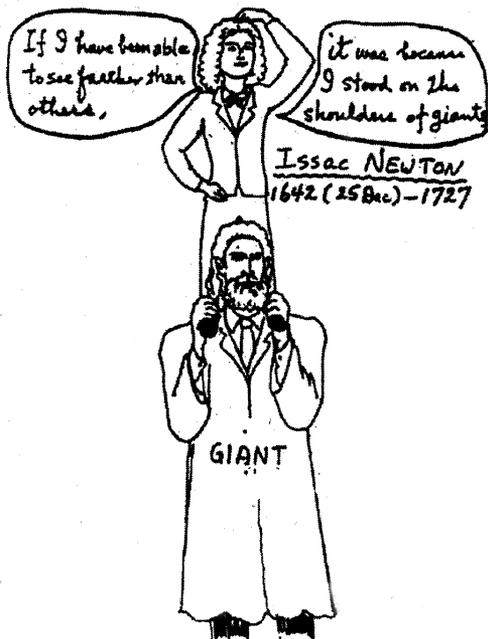
Превращение физики в самостоятельную науку обычно связывают с именем итальянского ученого Галилео Галилея (Galileo Galilei, 1564—1642 гг.). Основной задачей физики он считал эмпирическое установление количественных связей между характеристиками явлений и выражение этих связей в математической форме с целью дальнейшего исследования их математическими средствами, в роли которых выступали геометрические чертежи и арифметическое учение о пропорциях. Использование этих средств регулировалось сформулированными им основными принципами и законами (принцип относительности, принцип независимости действия сил, закон равноускоренного движения и др.).

Достижения Галилея и его современников в области физики движения — австрийского (немецкого) астронома и математика Иоганна Кеплера (Johannes Kepler, 1571—1630 гг.), французского философа, математика и физика Рене Декарта (René Descartes, 1596—1650 гг.), голландского ученого Христиана Гюйгенса (Christiaan Huygens, 1629—1695 гг.) — подготовили почву для работ английского математика, механика, астронома и физика Исаака Ньютона (Sir Isaac Newton, 1643—1727 гг.), приступившего к оформлению целостного предмета механики в систему понятий. Сам Ньютон по этому поводу писал: *"Если я вижу лучше и дальше, это потому, что я стою на плечах исполинов и гигантов"* (рис. В1). На этой основе Ньютон сформулировал три закона движения (см. разд. 3.3, 3.6 и 3.9) и вывел из них ряд следствий, трактованных прежде как самостоятельные законы. Ньютоновские "Математические начала натуральной философии" (1687 г.) подвели итоги работы по установлению смысла и количественных характеристик основных понятий механики — "пространство", "время", "масса", "количество движения", "сила".

Начиная со времен Ньютона и вплоть до конца XIX в., механика трактуется как общее учение о движении и становится магистральной линией развития физики. С ее помощью строится физика взаимодействий, где конкурируют концепции близкодействия<sup>1</sup> и дальнодействия<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Согласно новой **концепции близкодействия** взаимодействие между телами осуществляется посредством тех или иных полей, непрерывно распределенных в пространстве.

<sup>2</sup> В соответствии с ранней **концепцией дальнодействия** взаимодействие между телами может осуществляться непосредственно через пустое пространство, которое не принимает участия в передаче взаимодействия, передача взаимодействия происходит мгновенно.



**Рис. В1.** Рисунок миссис Эсаки (Ms. Esaki) — жены лауреата Нобелевской премии Лео Эсаки (Dr. Leo Esaki) (Япония), подаренный лауреату Нобелевской премии по химии 2000 г. проф. Алану Мак-Диармиду (США) на Конференции Miyazaki Forum (29 октября 2001 г.)

Успехи небесной механики, основанные на **ньютоновском законе всемирного тяготения**, способствовали победе концепции дальнего действия. По образу теории тяготения строилась и физика взаимодействий в области электричества и магнетизма.

Начало научных исследований в области электричества и магнетизма было положено придворным врачом английской королевы Елизаветы — Уильямом Гильбертом Колчестерским (William Gilbert, 1544—1603 гг.). Итогом его многолетних исследований явился труд, опубликованный в Лондоне в 1600 г. под названием "О магните, магнитных телах и большом магните — Земле. Новая физиология, доказанная множеством аргументов и опытов".

В конце XIX в. физика вплотную поставила вопрос о реальном существовании атома. Штурм атома шел во всех основных разделах физики — механике, оптике, электричестве, учении о строении материи. Каждое из крупнейших научных открытий того времени: периодического закона элементов, электронов, радиоактивности, — по-своему вело к экспериментальному доказательству существования атома, ставило задачу изучения закономерностей атомных явлений. Начатые в 1906 г. экспериментальные исследования броунов-

ского движения подтвердили правильность молекулярно-кинетической теории этого явления и принесли полный триумф идеям атомизма. Развитие атомистики привело к открытию атомного ядра и к созданию планетарной модели атома. Эти открытия положили начало новой физике. Оказалось, что масса тела растёт с увеличением его скорости; химические элементы могут превращаться друг в друга; возникла электронная теория, представляющая новую ступень в развитии физики. Механическая картина мира уступила место электромагнитной.

16 июня 1874 г. открылась Кавендишская физическая лаборатория при Кембриджском университете — один из мировых центров экспериментальной физики, биологии и других фундаментальных исследований. Здесь были открыты электрон — 1897 г., искусственное расщепление атомного ядра — 1919 г., нейтрон — 1932 г., построена модель структуры ДНК<sup>1</sup> — 1953 г., созданы камера Вильсона — 1912 г., масс-спектрограф — 1913 г., линейный ускоритель — 1932 г.

После открытия электронов и радиоактивности физика стала развиваться с небывалой прежде быстротой. Вследствие неприменимости классической физики к объяснению теплового излучения родилась квантовая физика. Из конфликта классической механики и электромагнитной теории возникла теория относительности. Сначала теоретически, а затем экспериментально была установлена связь массы и энергии, зависимость массы движущегося тела от скорости его движения. Общая теория относительности, интерпретировавшая поле тяготения как искривление пространства-времени, обусловленное наличием материи, перекинула еще один мост от материи и движения к взаимодействию.

Способствуя развитию физического мышления, познанию современной физической картины мира, изучение физики не только формирует научное мировоззрение, но и закладывает фундамент для освоения специальных дисциплин. Эта теснейшая связь физики с другими отраслями естествознания, как отмечал советский физик Сергей Иванович Вавилов (1891—1951 гг.), привела к тому, что физика глубочайшими корнями вросла в астрономию, геологию, химию, биологию и другие естественные науки.

Связь физики с другими естественными науками просматривается и на примере развития старейшего российского университета — Санкт-Петербургского. Когда 28 января 1724 г. был создан Академический университет в Санкт-Петербурге, в его составе открылись три факультета: историко-филологический, философско-юридический и физико-математический, фак-

---

<sup>1</sup> Дезоксирибонуклеиновая кислота — основа хромосом.

тически охватывавший все естествознание. Тогда же в Санкт-Петербурге при Петербургской академии наук был создан физический кабинет Кунсткамеры — первое в России научно-исследовательское учреждение в области физики. 2 марта 1820 г. физико-математический факультет был разделен на два разряда: физико-математический и естествоиспытательский. По уставу 1863 г. физико-математический факультет состоял из 12 кафедр: чистой математики, механики аналитической и практической, астрономии и геодезии, физики, химии опытной и теоретической, минералогии, физической географии, геогнозии и палеонтологии, ботаники, зоологии, технической химии, агрономической химии. На физико-математическом факультете (разряд естественных наук) учились или работали: физик Эмилий Христианович Ленц (1804—1865 гг.), химики Александр Абрамович Воскресенский (1809—1880 гг.) и Александр Михайлович Бутлеров (1828—1886 гг.), зоолог Карл Федорович Кёсслер (1815—1881 гг.), ботаник-эволюционист Андрей Николаевич Бекетов (1825—1902 гг.), математик Пафнутий Львович Чебышев (1821—1894 гг.), физиологи Иван Михайлович Сеченов (1829—1905 гг.) и Иван Петрович Павлов (1849—1936 гг.), биолог Илья Ильич Мечников (1845—1916 гг.), почвовед и один из первых русских экологов Василий Васильевич Докучаев<sup>1</sup> (1846—1903 гг.), геолог Александр Александрович Иностранцев (1843—1919 гг.). На заседании совета физико-математического факультета защитили свои докторские диссертации химик Дмитрий Иванович Менделеев (1834—1907 гг.) и геолог П. А. Пузыревский. В мае 1930 г. из физико-математического факультета выделился биологический факультет, а также факультет географии и геофизики, а с сентября 1932 г. в составе университета помимо физического факультета уже самостоятельно функционировали биологический<sup>2</sup>, математико-механический, геологический, географический<sup>3</sup> и химический факультеты.



---

Все современные естественные науки выросли из физики, а вследствие всеобщности физических законов возникло множество смежных с физикой дисциплин (геофизика, биофизика, медицинская физика, физическая химия, химическая физика, астрофизика и т. п.).

---

**Геология** — комплекс наук о составе, строении и истории развития земной коры и Земли. Истоки геологии относятся к глубокой древности и связаны с

---

<sup>1</sup> Главный научный труд В. В. Докучаева, переизданный в 1948 г., — "К учению о зонах природы".

<sup>2</sup> Ныне биолого-почвенный факультет.

<sup>3</sup> Ныне факультет географии и геоэкологии.

первыми сведениями о горных породах, минералах и рудах. Термин "геология" ввел в 1657 г. норвежский ученый М. П. Эшолт (M.P. Escholt). В самостоятельную ветвь естествознания геология выделилась в XVIII—XIX вв. (У. Смит, А. Г. Вернер, Дж. Геттон, Ч. Лайель — за рубежом; Михаил Васильевич Ломоносов (1711—1765 гг.), В. М. Севергин — в России). Качественный скачок в истории геологии — превращение ее в комплекс наук (конец XIX—начало XX вв.) — связан с введением физико-химических методов исследования. Геология тесно связана с физической географией, геофизикой, кристаллографией, палеонтологией и др.

**Геофизика** — комплекс наук, изучающих физические свойства Земли в целом и физические процессы, происходящие в ее твердой (литосфере), жидкой (гидросфере) и газообразной (атмосфере) оболочках, находящихся в постоянном взаимодействии.

Учитывая возрастающую роль таких природных эндогенных (внутренних) факторов, как землетрясения, медленные подъемы и опускания суши и др., и таких экзогенных (внешних) факторов, как выветривания, оползнепроявления и др., а также антропогенно-техногенных сил (взрывов, загрязнений окружающей среды и др.), целесообразно выделить еще одну оболочку — **биотехносферу**. В нее включают части атмосферы, гидросферы, земной коры, являющиеся средой обитания человека и испытывающие антропогенно-техногенную нагрузку. Раздел геофизики, предназначенный для изучения этой оболочки Земли, называют **геофизикой биотехносферы** или **геофизической экологией**.



---

**Антропогенные воздействия** на природу — различные формы влияния деятельности человека на природу. Антропогенные воздействия охватывают отдельные компоненты природы и природные комплексы. Количественной и качественной характеристикой антропогенного воздействия является антропогенная нагрузка. Антропогенные воздействия могут носить как позитивный, так и негативный характер: последнее вызывает необходимость в применении специальных природоохранных мер.

---

Теория геофизических методов исследований — физико-математическая. Математическое решение прямой задачи геофизики, т. е. определение параметров поля по известным свойствам и размерам геологических тел, хотя иногда очень сложно, но единственно. Однако одно и то же распределение параметров физического поля может соответствовать различным соотношениям физических свойств и размеров геологических объектов. Математическое решение обратной задачи геофизики, т. е. определения размеров геоло-

гических объектов и свойств слагающих их пород по наблюдаемому полю, не только значительно сложнее, но и, как правило, не единственно.



**Геофизические методы разведки** представляют собой исследование строения земной коры физическими методами с целью поисков и разведки полезных ископаемых.

Геофизические методы разведки основаны на изучении физических полей (гравитационных, магнитных, электрических, упругих колебаний, термических, ядерных излучений) на поверхности Земли (суши и моря), в воздухе и под землей (в скважинах, шахтах). Геофизические методы разведки используют как естественные физические поля (например, **гравиметрическая разведка** (см. разд. 5.10), **электроразведка**, **магнитная разведка**, так и искусственно создаваемые (например, **сейсмическая разведка**).

---

В последние десятилетия значительно выросла роль физики в биологии. Это объясняется тем, что структурную и функциональную организацию процессов жизнедеятельности в значительной мере можно объяснить с точки зрения физики и химии. Возникли и продолжают возникать и развиваться смежные с физикой и биологией науки. **Биофизика** изучает физические и физико-химические явления в живых организмах, структуру и свойства биополимеров, влияние различных физических факторов на живые системы; **биомеханика** изучает законы движения биологических систем; **генетика** рассматривает явления наследственности на молекулярном уровне; **радиобиология** изучает действие ионизирующих излучений на живые организмы; **биоэнергетика** занимается вопросами механизма генерации и переноса энергии в живых объектах. Развиваются кинетические методы исследования биологических процессов. Большое значение приобрело учение о биоэлектрических явлениях, обуславливающих возникновение биоэлектрических потенциалов, и т. д.

**Химическая физика** — раздел физики, пограничный между химией и физикой, — наука о физических законах, управляющих строением и превращениями химических веществ. Ломоносов в 1751 г. в своем знаменитом "Слове о пользе химии" сказал: *"Когда химия будет действовать через геометрию, механику и оптику, она, вероятно, достигнет желаемых тайностей"*.

Рождение химической физики как самостоятельной науки обусловлено появлением в начале XX в. квантовой механики, законы которой стали базой теории химической связи, межмолекулярных взаимодействий и реакционной способности молекул, а также развитием исследований по взаимодействию

электромагнитного излучения (света) и вещества. Термин "химическая физика" ввел немецкий химик А. Эйкен (A. Eucken) в 1930 г., который третье издание своего учебника назвал "Курс химической физики" (Lehrbuch der chemischen Physik), в отличие от первого и второго, носивших название "Основные начала физической химии" (Grundriss der physikalischen Chemie).

**Экология** — наука об отношениях растительных и животных организмов между собой и окружающей средой. Главным образом экология занимается рациональным природопользованием. Экологический подход становится необходимым при решении производственных и научно-технических задач.

Термин "экология"<sup>1</sup> был введен немецким биологом Эрнстом Гёккелем (Ernst Haeckel, 1834—1919 гг.) в 1866 г. На рубеже XIX и XX вв. слово "экология" было известно только очень ограниченному кругу лиц. Не случайно ранние биографы Геккеля, говоря о его заслугах на разных поприщах, авторство термина "экология" даже не упоминают. Вначале это понятие означало науку, занимающуюся отношениями организмов с их окружением и условиями их существования. Первоначально экология была лишь разделом биологии. В XIX в. разноплановые исследования, касающиеся отношений человека с совокупностью окружающих его живых существ, объединились в одно научное направление, которое перешло к изучению экосистем. В 1940-е гг. экосистема интерпретировалась как форма циркуляции органической материи по элементарным цепям. Затем представления расширились до биосферы и ноосферы.

Биосфера как целостная саморазвивающаяся система может сохранять равновесие и компенсировать внешние нагрузки — как природные (колебания солнечной активности, падение метеоритов, интенсивная вулканическая деятельность, землетрясения и т. д.), так и вызванные деятельностью человека (загрязнения окружающей среды, истощение природных запасов, интенсивное сжигание ископаемых энергоносителей, вовлечение в биосферные циклы ядерного горючего и т. д.) — лишь до определенных пределов. Интенсификация техногенной деятельности человека привела к тому, что биосфера стала подвергаться высоким антропогенным нагрузкам и ее устойчивость стала нарушаться.

В современную эпоху специализации человеческой деятельности естественные связи между различными дисциплинами часто исчезают из нашего поля зрения вследствие обилия сведений в пределах каждой дисциплины. Такой сдвиг границ и самого предмета исследований был особенно заметен как раз в экологии с ростом общественного интереса к этой науке. Сейчас слово

---

<sup>1</sup> Состоит их двух греческих корней: oikos (дом) и logia (речь, слово).

"экология" для многих означает "совокупность человека и окружающей среды".

Значительную роль в пробуждении "экологического" сознания в 1960—1970-е гг. сыграли работы Римского клуба, созданного в 1968 г. Выделение проблемы природоохраны в качестве самостоятельного направления в системе международных отношений относится к началу 1970-х гг. Определяющую роль в этом сыграли подготовка и проведение в Стокгольме (1972 г.) форума по охране окружающей среды. В середине 1980-х гг. получил развитие новый процесс — экологизация всего комплекса международных отношений. Кульминацией этого процесса стала Конференция по окружающей среде и развитию (Рио-де-Жанейро, 1992 г.), на которой проблема взаимоотношения общества и природы была поставлена в контексте сохранения не только окружающей среды и природных ресурсов, но и человеческой цивилизации как таковой. Концептуальной основой новой стратегии стала идея устойчивого развития, реализация которой неотделима от разумного баланса экономических, социальных и экологических процессов как внутри отдельных государств, так и в мировом сообществе.

Конференция в Рио-де-Жанейро стала этапом в развитии экологизации массового сознания. Во все большем числе стран растет понимание того, что экологический рычаг постепенно превращается в универсальный инструмент постановки проблемы, связанной с условиями и качеством жизни, и общественного контроля за ее решением. При этом понятие "экологической грамотности" сводится в основном к пониманию самого факта опасности загрязнения окружающей среды. Если задачу ставить таким образом, то можно считать, что за последние несколько десятилетий эта задача выполнена полностью и на "отлично" — вряд ли сегодня найдется человек, не понимающий этой опасности. В наши дни каждый остро осознает важность наук о среде для поддержания и повышения уровня современной цивилизации.

Институт Блэксмита в 2006 г. опубликовал список наиболее загрязненных мест планеты, включающий более 300 названий. По словам директора института Ричарда Фуллера, загрязнение окружающей среды оказывает негативное влияние на здоровье как минимум миллиарда жителей планеты. Порядка 20% смертей в развивающихся странах напрямую связаны с экологическими проблемами. Наряду с Чернобылем (Украина), Кабве (Замбия) и Ла Оройя (Перу) в первую десятку включены сразу три российских: Норильск, Дзержинск (Нижегородская область) и поселок Рудная Пристань (Приморский край). Большинство населенных пунктов, вошедших в первую десятку, являются крупными центрами добычи угля и металлов (Кабве — центр добычи и выплавки цветных металлов, в Норильске сосредоточено производство никеля, меди, кадмия и свинца, в Рудной Пристани находится одно из крупнейших в России месторождений свинца).

Однако не требует доказательств и то, что современная цивилизация уже не может обойтись без развития техники. Это наша реальность. Даже если отдельные люди найдут в себе силы полностью отказаться от благ цивилизации (транспорт, электроэнергия, отопление и т. п.) и товаров (производимых в большинстве случаев с вмешательством в окружающую среду), перейдя на натуральное хозяйство, проблемы это все равно не решит.

Приходится признать, что какой бы заманчивой идея отказа от благ цивилизации не казалась, обратного пути у современной цивилизации, неразрывно связанной с научно-техническим прогрессом, нет. Раз современная цивилизация не может отказаться от благ научно-технического прогресса, то лишь дальнейшие исследования в области физики и других естественных наук помогут не только разрешить злободневные проблемы, но и добиться создания в будущем условий, не позволяющих наносить вред окружающей среде. Примеры тому уже есть: созданы экологически чистые альтернативные источники энергии (при этом непосредственно или косвенно используются не нарушающие термодинамическое равновесие и возобновляемые с точки зрения масштабов времени, сопоставимых со временем жизни Земли, источники энергии), ведутся работы по не столь уж экологически безупречному, но все же более экологически безопасному источнику энергии — термоядерному синтезу, с каждым годом увеличивается доля автомобилей с электрическими или водородными двигателями. Пока еще электрическая энергия, рожденная солнечными лучами, обходится намного дороже, чем получаемая традиционными способами. Но, тем не менее, станции-преобразователи солнечной энергии строят, и они работают.

Впрочем, опасность может представлять даже само развитие науки. Именно поэтому все важнее становится самоограничение учеными развития отдельных областей современного естествознания (запреты на клонирование человека, ограничение использования трансгенных продуктов и т. п.). Возможно, в прошлом веке и стоило ограничить развитие отдельных направлений ядерной физики. Однако, кто как не сами физики, химики и биологи способны установить такие границы? Плохо знающие естественные науки экологи не способны сделать это, просто не понимая из-за ограниченности своих знаний опасности развития того или иного направления науки. Сконцентрировав свое внимание на простом и понятном, можно пропустить значительно более опасное. Да и так ли убедителен человек, клеймящий, например, атомную энергетику, и не понимающий даже принципа работы атомной электростанции?

Совсем не случайно одна из первых работ в области теоретической экологии — книга американского ученого Альфреда Джеймса Лотки (1880 г.) — называлась "Элементы физической биологии". Хотя сам термин "экосистема"

довольно позднего происхождения (он был предложен английским экологом Артуром Тенсли в 1935 г.), некоторые природные объекты фактически трактовались исследователями как экосистемы значительно раньше. Так, уже в начале XX в. американский лимнолог Эдвард Бердж пытался количественно оценить "дыхание озера", т. е. динамику процессов кислородного обмена, в котором участвуют как физические, так и биологические процессы. В 1942 г. в журнале *Ecology* публикуется получившая широкую известность статья молодого американского исследователя Раймонда Линдемана "Трофо-динамический аспект экологии". Экосистема в этой работе определялась как "совокупность физико-химико-биологических процессов, протекающих в любых масштабах пространства-времени", при этом подчеркивалось теснейшее взаимодействие физических, химических и биологических процессов.

В последние годы широкое распространение получила прикладная экология. Одним из направлений которой является **физическая экология**, т. е. раздел экологии, изучающий физику окружающей среды.

В начале XXI в. начало развиваться совершенно новое научное направление — энергоэкология. Очевидно, что энергетика и экология в какой-то степени антагонисты, и одна из задач нового направления — найти между ними компромисс.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что "академическое" понятие экологии мало соответствует общепринятому, под которым скорее сегодня понимается **природопользование** — наука, изучающая принципы рационального использования природных ресурсов, в том числе анализ антропогенных (т. е. в результате деятельности человека) воздействий на природу, их последствий для человека.

Взаимосвязь между физической географией и экологией нашла отражение в становлении геоэкологии. Выделение геоэкологии в самостоятельную науку связано с целесообразностью объединения изучения пространственного взаимодействия природных явлений с исследованием взаимоотношений между ними в границах определенного природного комплекса. Интересы геоэкологии сосредоточены на анализе структуры и функционирования ландшафтов, взаимоотношений их составных биотических и косных (абиотических, неживых) компонентов, воздействия общества на природные составляющие. Под геоэкологией также понимают экологию геологической среды.

**Геоэкология** — наука об экологических проблемах геосфер.



---

Неполное перечисление наук, связанных с изучением природы, показывает, как важно знать основы физики (науки о природе) студентам различных естественно-научных специальностей.

---



# Основные термины и обозначения

В данном издании векторные величины обозначаются жирным шрифтом, а скалярные — обычным (например,  $E$  — скаляр, а  $\mathbf{E}$  — вектор).

Символ	Термин	Размерность
$[a b]$	Векторное произведение векторов $a$ и $b$ ( $a \times b$ )	
$(a b)$	Скалярное произведение векторов $a$ и $b$ ( $a \cdot b$ )	
$a$	Ускорение	$\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$
$a_n$	Нормальное ускорение	$\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$
$a_\tau$	Тангенциальное (касательное) ускорение	$\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$
$A$	Работа (силы) в механике	Дж
$E$	Модуль упругости, модуль Юнга	Па
$E$	Энергия	Дж
$E_K$	Кинетическая энергия	Дж
$E_{\text{П}}$	Потенциальная энергия	Дж
$E_{\text{цб}}$	Центробежная энергия	Дж
$F$	Сила	Н
$F_T$	Сила тяжести	Н
$F_{\text{тяг}}$	Сила тяготения	Н
$F_{\text{цб}}$	Центробежная сила инерции	Н

(продолжение)

Символ	Термин	Размерность
$g$	Ускорение свободного падения	$\text{м}\cdot\text{с}^{-2}$
$g_{\text{э}}$	Значение ускорения свободного падения на экваторе	$\text{м}\cdot\text{с}^{-2}$
$g_{\varphi}$	Значение ускорения свободного падения на широте $\varphi$	$\text{м}\cdot\text{с}^{-2}$
$G$	Модуль сдвига	Па
$h$	Высота	м
$H$	Высота, мощность слоя	м
$H$	Собственный кинетический момент гироскопа	Дж·с
$I$	Момент инерции	$\text{кг}\cdot\text{м}^2$
$k$	Жесткость	$\text{Н}\cdot\text{м}^{-1}$
$K$	Модуль сжатия, объемный модуль	Па
$l$	Путь	м
$L$	Момент импульса	Дж·с
$m$	Масса, инертная масса	кг
$m_{\text{гр}}$	Гравитационная масса	кг
$M$	Момент силы	Н·м
$M$	Масса	кг
$M_{\text{р}}$	Масса ракеты без топлива	кг
$M_{\text{т}}$	Начальная масса топлива	кг
$n$	Количество вещества	моль
$N$	Мощность	Вт, л. с.
$p$	Давление	Па, $\text{Н}\cdot\text{м}^{-2}$
$P$	Импульс	$\text{кг}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$
$P$	Вес	Н
$r$	Радиус	м
$r_g$	Гравитационный радиус	м, км
$R$	Радиус (кривизны)	м
$R_3$	Радиус Земли	км

(продолжение)

Символ	Термин	Размерность
Re	Число Рейнольдса	—
Re <sub>кр</sub>	Критическое значения числа Рейнольдса	—
<i>S</i>	Перемещение	м
<i>t</i>	Время	с, ч
<i>T</i>	Температура	°С, К
<i>v</i>	Скорость	м·с <sup>-1</sup>
<i>V</i>	Объем	м <sup>3</sup>
<i>x</i>	Абсолютное удлинение	м
$\beta$	Отношение скорости к скорости света в вакууме	—
$\beta$	Угловое ускорение	рад·с <sup>-2</sup>
$\gamma_0$	Нормальное значение ускорения свободного падения	м·с <sup>-2</sup>
$\Gamma$	Напряженность гравитационного поля	м·с <sup>-2</sup>
$\Delta g$	Аномалия ускорения свободного падения	м·с <sup>-2</sup> , Гал, ге
$\Delta g_B$	Аномалия Буге	м·с <sup>-2</sup> , Гал, ге
$\Delta g_\phi$	Аномалия Фая	м·с <sup>-2</sup> , Гал, ге
$\varepsilon$	Линейная деформация, относительное удлинение	—
$\eta$	Коэффициент динамической вязкости, вязкость	Па·с
$\theta$	Объемная деформация	
$\mu$	Коэффициент трения	—
$\nu$	Коэффициент кинематической вязкости, вязкость	м <sup>2</sup> ·с <sup>-1</sup>
$\nu$	Коэффициент Пуассона	—
$\nu$	Частота колебаний	Гц
$\rho$	Плотность, массовая плотность	кг·м <sup>-3</sup>
$\sigma$	Механическое напряжение	Па, Н·м <sup>-2</sup>
$\varphi$	Географическая широта	градус
$\Phi$	Текучесть	м·с·кг <sup>-1</sup>
$\Phi$	Реактивная тяга, тормозящая сила	кН, кгс

(окончание)

Символ	Термин	Размерность
$\omega$	Угловая частота	рад·с <sup>-1</sup>
$\dot{\omega}$	Угловая скорость	рад·с <sup>-1</sup>
в. д.	Восточная долгота	
з. д.	Западная долгота	
ИСЗ	Искусственный спутник Земли	
ИСО	Инерциальная система отсчета	
МБР	Межконтинентальная баллистическая ракета	
НИСО	Неинерциальная система отсчета	
ОТО	Общая теория относительности	
СТО	Специальная (частная) теория относительности	
с. ш.	Северная широта	
ю. ш.	Южная широта	
IGSN-71	Международная стандартная гравиметрическая сеть 1971 г.	
max	Максимальное (наибольшее) значение	
min	Минимальное (наименьшее) значение	

# ГЛАВА 1

## Системы единиц

Движенья нет, сказал мудрец брадатый.  
Другой смолчал и стал перед ним ходить.  
Сильнее бы не мог он возразить;  
Хвалили все ответ замысловатый.  
Но, господа, забавный случай сей  
Другой пример на память мне приводит:  
Ведь каждый день пред нами Солнце ходит,  
Однако ж прав упрямый Галилей.

*А. С. Пушкин*

### 1.1. Механика. Исторический очерк развития основных идей и взглядов

Механика (от греческого *μηχανή*, машина) — одна из древнейших наук, возникшая из нужд практики. Раньше других разделов механики под влиянием запросов строительной техники стала развиваться статика. Ее научные основы разработали еще древнегреческие ученые Аристотель и Архимед (Ἀρχιμήδης, около 287—212 гг. до н. э.).

*"Всякое движение, — писал Аристотель, — бывает или насильственным, или происходящим по природе"*. К последним он относил круговые движения небесных светил, а также прямолинейные движения тяжелых тел (земли, воды) вниз и легких тел (огня, воздуха) вверх. Эти движения, считал Аристотель, присущи самим телам, и, будучи естественными, они не нуждаются в каких-либо внешних причинах.

Если какое-либо движение отличается от естественного, то оно может быть осуществлено лишь насильственным путем. В отношении таких движений Аристотель писал: *"Все движущееся необходимо приводится в движение чем-нибудь"*. Иными словами, причина "неестественного" движения — сила, действующая со стороны других тел. Нет силы — нет движения. В современных обозначениях **основной закон динамики Аристотеля** может быть представлен в виде:

$$F = k \frac{S}{t} \text{ или } F = kv, \quad (1)$$

где  $F$  — сила, приложенная к телу;  $v = \frac{S}{t}$  — скорость тела;  $k$  — постоянный для каждого тела коэффициент, пропорциональный весу данного тела.

Под скоростью Аристотель понимал "быстроту" движения. *"Быстрое, — писал он, — есть далеко продвигающееся в течение малого времени, медленно же — малопродвигающееся в течение большого времени"*.

Взгляды Аристотеля на движение тел соответствовали логике геоцентрической картины мира, а также существовавшему в то время уровню техники и средств передвижения. Самой сложной задачей для динамики Аристотеля оказалось движение брошенного тела: *"Раз всякий движущийся предмет, который не движет сам себя, приводится в движение чем-нибудь иным, то спрашивается: как некоторые предметы движутся непрерывно без соприкосновения с движущим, например тела брошенные?"*. Согласно Аристотелю, полет выпущенной из лука стрелы обусловлен действием воздуха, который был приведен в движение отпущенной тетивой и самой стрелой. *"Если мы говорим, — замечает комментатор трудов Аристотеля Симплиций (VI в.), — что человек, запускающий снаряд, сообщает воздуху постоянное движение, почему бы нам не сказать, что это движение сообщено снаряду, не обращаясь к воздуху?"*.

Сильный удар по воззрениям Аристотеля нанес в 517 г. греческий философ и богослов Иоанн Филопон (V—VI вв.): *"Если движение обязано давлению воздуха на обратную сторону тела, то заостренная с хвоста стрела должна была бы лететь медленнее, чем незаостренная. В действительности же происходит как раз обратное. Почему? И почему камень можно бросить дальше, чем перо?"*. Продолжая рассуждения Филопон отмечал: *"И далее, если тетива и стрела или рука и камень непосредственно соприкасаются, какой же воздух позади снаряда будет приведен в движение? А если будет приведен в движение воздух сбоку, какое отношение имеет он к брошенному телу, не находясь на его пути? Из этих и подобных соображений видно, что невозможно, чтобы предметы, движутые силой, стали двигаться таким образом. Вернее, должно быть, что бросающий сообщает брошенному предмету некую бестелесную кинетическую мощь, а воздух, который он толкает, ничего не привносит или [привносит] очень мало в это движение"*.

В средневековой литературе внутренняя сила, сообщаемая брошенному телу (*"бестелесная кинетическая мощь"* по Филопону), получила название "импульс" (лат. "стремление вперед", "напор", "натиск"). Особенно широко это понятие распространилось благодаря работам французского ученого, ректора

Парижского университета Жана Буридана (Jean Buridan, около 1295—1358 гг.). Проанализировав задачу о брошенном теле в трактате под названием "Вопросы к восьми книгам "Физики" Аристотеля", он сразу же заявил: *"Аристотель, как мне кажется, неправильно решил эту задачу"*. Повторив далее некоторые из аргументов Филопона и добавив к ним собственные, Буридан сделал вывод: *"Поэтому, как мне представляется, необходимо сказать, что движитель, приводя в движение перемещающееся тело, внедряет в него определенный напор или некую присущую перемещающемуся телу двигательную силу, действующую в том же направлении, в каком движитель двигал перемещенное тело"*. По мнению Буридана, этот напор в теле по мере его движения *"непрерывно уменьшается сопротивляющимся воздухом"* и *"движение камня постепенно замедляется"*, так что, в конце концов, *"тяжесть камня одерживает верх и направляет камень в его естественное место"*.

Эти идеи сыграли важную роль в развитии физических представлений и в определенной степени предвосхитила такие фундаментальные понятия современной физики, как *импульс* (см. разд. 3.8) и *кинетическая энергия* (см. разд. 8.4).

Первым, кто осознал, что без опоры на эксперимент и широкое использование математики дальнейшее развитие физики невозможно, был Галилей. По его словам, *"книга природы написана математическими знаками"*, и в механике, как и в других науках, в которых для объяснения законов природы применяются математические доказательства, основные принципы должны подтверждаться *"опытом, воспринимаемым чувствами"*.

В 1632 г. в "Диалогах и математических доказательствах, касающихся двух новых наук, механики и местного движения" Галилей ввел ряд понятий и свойств, в частности, понятия силы и форм движения. Сам автор считал свой труд шедевром. В нем он подводил итоги более чем 40-летних исследований в области изучения механических свойств тел ("механики") и перемещений их из одного места в другое ("местного движения"). Понимая, что его труд открывал новую страницу физики, Галилей торжественно провозгласил: *"Мы создаем совершенно новую науку, предмет которой является чрезвычайно старым. В природе нет ничего древнее движения, но именно относительно него философами написано весьма мало значительного. Поэтому я многократно изучал на опыте его особенности, вполне этого заслуживающие, но до сего времени либо неизвестные, либо недоказанные"*. Правда, отмечал Галилей, некоторые положения уже были выдвинуты другими, например, Аристотелем, однако *"его рассуждения не принадлежат к числу удачных"*.

В 1633 г. инквизиция запретила "Диалоги" к чтению, а самого Галилея объявила своим узником.

Ньютон дал в 1686—1687 гг. в своем фундаментальном труде "Математические начала натуральной философии" законченную теорию *кинематики* и *динамики* (впрочем, без ссылки на Галилея). Именно эти "начала" и послужили действительным началом науки механики в ее современном понимании.

### 1.1.1. Предмет и структура современной механики

**Механика** — наука о механическом движении материальных тел и происходящих при этом взаимодействиях между ними.

Под **механическим движением** понимают изменение с течением времени взаимного положения тел или частиц в *пространстве*; например, движение небесных тел, колебания земной коры, воздушные и морские течения, движения летательных аппаратов и транспортных средств и т. п.

Под механикой мы будем понимать так называемую **классическую**<sup>1</sup> **механику**, в основе которой лежат законы механики Ньютона, а предметом ее изучения являются движения любых материальных тел (кроме элементарных частиц), совершаемые со скоростями, малыми по сравнению со скоростью света.

Механику разделяют на:

- механику материальной точки;
- механику системы материальных точек;
- механику абсолютно твердого тела;
- механику сплошной среды.

**Статика** — учение о равновесии тел под действием сил.

**Кинематика** — раздел механики, в котором движение тел рассматривается без выяснения причин этого движения, т. е. учение о геометрических свойствах движения тел.

**Динамика**<sup>2</sup> — учение о движении тел под действием сил.

Научные основы динамики, а с ней и всей механики были разработаны в XVII в. Основоположник динамики — Галилей, который дал первое верное

---

<sup>1</sup> Другие названия — нерелятивистская, ньютоновская.

<sup>2</sup> В 335 г. до н. э. Аристотель создал собственную научную школу — Ликей, которым руководил почти до самой смерти. Именно здесь были написаны его знаменитые лекции по физике; в них впервые появилось новое понятие "динамис" — "сила". Теперь раздел механики, изучающий влияние сил на движение тел, называют динамикой.

решение задачи о движении тела под действием силы; его исследования привели к открытию закона инерции и принципа относительности движения (см. разд. 3.2); им же положено начало теории колебаний и науке о сопротивлении материалов.

### Контрольные вопросы

- ? В чем состоит задача механики?
- ? Какие разделы механики Вы знаете?

## 1.2. Материальная точка

Всякое тело имеет определенные размеры. Различные части тела находятся в разных местах *пространства*. Однако во многих задачах механики нет необходимости указывать положения отдельных частей тела.

**Материальная точка** — понятие, вводимое в механике для обозначения объекта, который рассматривается как точка, имеющая *массу*.

Если размеры тела малы по сравнению с расстояниями до других тел, то данное тело можно считать материальной точкой. Так можно поступать, например, при изучении движения планет вокруг Солнца.

Положение материальной точки в *пространстве* определяется как положение геометрической точки. Практически всякое тело можно рассматривать как материальную точку в случаях, когда расстояния, проходимые точками тела, очень велики по сравнению с его размерами.



---

Материальная точка характеризуется только массой и положением в *пространстве*. Понятие материальной точки — научная абстракция, модель, обеспечивающая упрощенное математическое описание движения. Приближением материальной точки может быть любое тело, размерами которого в условиях данной задачи можно пренебречь (т. е. размеры которого пренебрежимо малы по сравнению с масштабами движения).

---

В первых разделах классической механики везде, где обратное не оговорено специально, мы будем в качестве объекта исследования рассматривать материальную точку или систему материальных точек, хотя наши рассуждения в дальнейшем часто будут применимы и к частицам, и к телам.

### Контрольные вопросы

- ? Дайте определение материальной точки.
- ? Для чего введено понятие "материальная точка"?
- ? В каких случаях твердое тело можно заменить материальной точкой?

## 1.3. Пространство и время

Единственное различие между временем и любым из трех пространственных измерений заключается в том, что наше сознание движется вдоль него.

Г. Дж. Уэллс<sup>1</sup>

**Пространство и время** — категории, обозначающие основные формы существования материи.

**Пространство** выражает порядок сосуществования отдельных объектов, **время** — порядок смены явлений.

**Однородность времени** означает, что если в два любые момента времени все тела *замкнутой системы* поставить в совершенно одинаковые условия, то, начиная с этих моментов, все явления в ней будут протекать совершенно одинаково.

**Однородность пространства** означает, что если *замкнутую систему* тел перенести из одного места пространства в другое, поставив при этом все тела в ней в те же условия, в каких они находились в прежнем положении, то это не отразится на ходе всех последующих явлений. В этом же смысле понимают и **изотропию пространства**, только вместо переноса замкнутой системы нужно говорить об ее повороте в пространстве на любой угол.

Норвежский математик Софус Ли (S. Lie, 1842—1899 гг.), немецкие математики Феликс Клейн (F. Klein, 1849—1925 гг.) и Эмми Нетер (E. Noether, 1882—1935 гг.) установили связь основных законов сохранения с пространственно-временной симметрией: *сохранение* таких фундаментальных физических величин, как *энергия, импульс и угловой момент*, выступает как следствие того, что пространство и время изотропны и однородны.

Незыблемым принципом, провозглашенным еще Ньютоном, оставался **принцип абсолютности пространства и времени**.

Абсолютность пространства и времени, абсолютный характер длины и временных интервалов, а также абсолютный характер одновременности событий получили четкое выражение в *принципе относительности Галилея*.

<sup>1</sup> Герберт Джордж Уэллс (Wells, 1866—1946 гг.) — английский писатель.

*Специальная (частная) теория относительности* немецкого (американского) ученого Альберта Эйнштейна (Albert Einstein, 1879—1955 гг.) (см. разд. 10.1) выявила зависимость пространственных и временных характеристик объектов от скорости их движения относительно определенной системы отсчета и объединила пространство и время в единый четырехмерный пространственно-временной континуум — пространство-время.

Датский физик Нильс Хенрик Давид Бор (Niels Henrik David Bohr, 1885—1962 гг.) выдвинул принцип, согласно которому новая теория не отменяет старой, а только включает ее в себя как частный предельный случай (**принцип Бора**).

## 1.4. Физические измерения. Размерность

Какою мерою мерите, такую же отмерится и вам.

*Евангелие от Луки, 6:38*

Искусство измерения является могущественным оружием, созданным человеческим разумом для проникновения в законы природы и подчинения ее сил нашему господству.

*Б. С. Якоби<sup>1</sup>*

С измерениями человек сталкивается всю жизнь. Изучение физических явлений и процессов также связано с измерением значений физических величин.

**Измерить** физическую величину — сравнить ее значение с физической величиной, принятой за единицу.

**Измерение** — последовательность экспериментальных и вычислительных операций, осуществляемая с целью нахождения значения физической величины, характеризующей некоторый объект или явление.

Измерение завершается определением степени приближения найденного значения к истинному значению величины.

**Размерность** единицы физической величины — выражение, показывающее, во сколько раз изменится единица данной величины при известном изменении единиц величин, принятых в данной системе в качестве основных.

**Эталон** — измерительное устройство, предназначенное и утвержденное для воспроизведения и (или) хранения и передачи шкалы измерений или размера единицы измерений средствам измерений.

---

<sup>1</sup> Борис Семенович Якоби (1801—1874 гг.) — российский физик и электротехник.

Эталоны призваны обеспечивать единство измерений в той или иной области науки. Эталон воспроизводит и (или) хранит всю или какую-либо часть шкалы измерений, одно значение (одну точку шкалы) или нескольких значений измеряемой величины. Различают первичные, вторичные, рабочие и тому подобные эталоны.

В России эталоны хранились в Главной палате мер и весов, созданной в 1893 г. по инициативе Д. И. Менделеева (ведет историю от Депо образцовых мер и весов, 1842 г.). В 1931 г. палата реорганизована в Институт метрологии и стандартизации, с 1934 г. — Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева (ВНИИМ) в Санкт-Петербурге.

### 1.4.1. Время

Измерение времени основано на наблюдении или осуществлении периодически повторяющихся процессов одинаковой продолжительности; так, для измерения больших интервалов времени пользуются годом. Суточное вращение Земли относительно звезд определяет звездное время. На практике пользуются солнечным временем. Время, определенное для заданной долготы, называют **местным временем**. 8 февраля 1879 г., выступая в Канадском институте в Торонто, инженер-железнодорожник Сэндфорд Флеминг предложил ввести универсальное стандартное время (UST), разделив земной шар на 24 часовых пояса. 13 октября 1884 г. Гринвичский меридиан был принят за универсальный меридиан времени, от которого вычисляется стандартное время по всему миру. Местное среднее солнечное время Гринвичского меридиана называют **всемирным временем (мировым)**. Для практического удобства в большинстве стран принята система поясного времени. Равномерная система счета времени (**эфмеридное время**) контролируется наблюдениями обращения Луны вокруг Земли. Измерение и хранение времени осуществляются различными часами.

Единицей измерения времени была принята секунда. Первоначально **секунда** (от лат. *secunda division* — второе деление; первоначально градуса, а затем и часа) была определена как  $1/86\,400$  солнечных суток<sup>1</sup>. Однако исследования показали, что период вращения Земли не остается постоянным. За столетие он увеличивается на 0,0014 с, т. е. скорость вращения Земли замедляется. Кроме того, по разным причинам период может отклоняться от среднего значения на 0,004 с. Для уровня развития техники XX в. погрешность, вытекающая даже из столь малой неравномерности, оказалась весьма существенной. Поэтому XII Генеральная конференция по мерам и весам в октябре 1964 г.

---

<sup>1</sup> Это так называемая **звездная секунда**, равная 0,99726966 эфмеридной секунды, размер которой связан с периодом обращения Земли вокруг Солнца.

приняла решение перейти к новому эталону секунды, основанному на квантовых излучательных процессах в атоме цезия. По резолюции XIII Генеральной конференции по мерам и весам (1967 г.) **атомная секунда** равна 9 192 631 770 периодам излучения, соответствующего энергетическому переходу между двумя уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия  $^{133}\text{Cs}$ . Такой эталон наилучшим образом удовлетворяет требованиям современной науки и техники (табл. 1).

С 1 января 1972 г. многие страны перешли к измерению времени в атомных секундах. В России "цезиевые" эталоны времени находятся в Институте метрологии времени и пространства в подмосковном поселке Менделеево, а также в Голицыно.

**Таблица 1.** Примеры значений времени [1]

Пример	Продолжительность, с
Ядерная реакция	$1 \cdot 10^{-18}$
Сжатие капельки дейтерия в ядерном реакторе с помощью лазерного излучения	$1 \cdot 10^{-9}$
Взрыв капсуля патрона	$1 \cdot 10^{-6}$
Время, за которое лопается мыльный пузырь	$1 \cdot 10^{-3}$
Взмах крыла пчелы	0,03
Удар сердца человека	1
Прохождение луча света от Солнца до Земли	498
Промежуток между приливом и отливом	21 600
Полный оборот Земли вокруг своей оси	88 164
Полный оборот Земли вокруг Солнца	31 472 009
Период полураспада атома углерода $^{14}\text{C}$	$1,79 \cdot 10^{11}$
Полный оборот Солнечной системы вокруг центра Галактики (225000000 лет)	$7,08 \cdot 10^{15}$
Предполагаемая продолжительность жизни на Земле	$1 \cdot 10^{17}$
Предполагаемый возраст Вселенной	$3,2 \cdot 10^{17}$

## 1.4.2. Длина

Более тысячи лет назад людей вполне устраивал, например, такой эталон единицы длины, как расстояние от указательного пальца вытянутой руки английского короля до кончика его носа. Примерно тогда же площадь поля,

которое за день успевала вспахать пара волов, была единицей измерения площади, названной акром ( $4046,86 \text{ м}^2$ ). Уложили впритык три ячменных зерна — появился дюйм ( $0,0254 \text{ м}$ ).

Так же устанавливали меры и на Руси. Уже в XI—XIII вв. на Руси фигурировали такие меры длины, как **пядь** (расстояние между растянутыми указательным и большим пальцами руки, равное  $0,17779 \text{ м}$ ), **сажень** (расстояние между концами средних пальцев рук, разведенных в стороны, равное  $2,1336 \text{ м}$ ), **локоть** (длина локтевой кости человека, равная  $38—46 \text{ см}$ ). Мерой сыпучих тел, например зерна, были кадь, половник и **четверть** (равная  $209,91 \text{ л}$ ), земельной поверхности — **казенная десятина** (равная  $1,09254 \text{ га}$ ). В основе меры массы лежала **киевская гривна**, равная  $409,5 \text{ г}$ .

Даже в бурную эпоху Великой Французской революции Национальный конвент считал введение метра достойным своего постановления. 7 апреля 1795 г. Конвент утвердил положение о том, что мера длины метр (франц. *metre*, от греч. *metron* — мера) составляет  $0,0000001$  часть четверти длины парижского меридиана. Напротив Люксембургского дворца в Париже до сих пор находится эталон метра. На памятной доске написано: *"Национальный конвент установил 16 эталонных метров из мрамора в самых посещаемых местах Парижа для того, чтобы сделать всеобщим достоянием метрическую систему"*. Эти эталоны метра были установлены в период с февраля 1796 по декабрь 1797 г.

Естественно, точность такого эталона была явно недостаточна. Поэтому со временем перешли к международному материальному прототипу метра, представляющему собой стержень из платино-иридиевого сплава со штрихами на концах, расстояние между которыми было принято за 1 метр (франц. *metre*, от греч. *metron* — мера). Прототип метра и две его контрольные копии хранятся в Севре близ Парижа (Франция) в Международном бюро мер и весов.

Россия подписала Метрическую конвенцию в 1875 г. В 1899 г. эталонный метр № 28, по жребию доставшийся России, был утвержден в качестве государственного эталона. С тех пор платино-иридиевые стержни — прототипы метра № 11 и 28 — хранятся в сейфе в здании Института метрологии им. Д. И. Менделеева в Санкт-Петербурге. Но только 11 сентября 1918 г. Совет народных комиссаров принял декрет о введении в РСФСР международной метрической системы мер и весов, и метр и килограмм потеснили в России традиционные аршин ( $0,7112 \text{ м}$ ) и пуд ( $16,3805 \text{ кг}$ ). Международный прототип метра (погрешность которого  $1 \cdot 10^{-7}$ ) и национальные прототипы обеспечивали поддержание единства и точности измерений на необходимом для науки и техники уровне в течение десятков лет.

После XI Генеральной конференции по мерам и весам в 1960 г. международный эталон метра регулярно проверяется по естественному, заимствованному

у природы эталону, вычисленному через длину волны излучения газа криптон-86. "Метр есть длина, равная 1 650 763,73 длины волны оранжевого излучения криптона-86". Для воспроизведения метра в Институте метрологии им. Д. И. Менделеева был создан уникальный эталонный комплекс, в который входили криптоновая лампа, эталонный интерференционный компаратор и фотоэлектрический спектроинтерферометр. Измерение длины прототипа № 28 на эталонном интерферометре показало, что он больше метра по определению 1960 г. на 0,22 мкм.

В 1983 г. XVII Генеральная конференция по мерам и весам приняла следующее определение: "**метр** — длина пути, проходимого светом в вакууме за  $1/299\,792\,458$  долю секунды" (табл. 2).

Таблица 2. Примеры значений длины [1]

Пример	Длина, м
Диаметр атома водорода	$3 \cdot 10^{-11}$
Диаметр молекулы глюкозы	$7 \cdot 10^{-10}$
Диаметр молекулы ДНК	$2 \cdot 10^{-9}$
Длина волны красного света	$7 \cdot 10^{-7}$
Средний диаметр клетки человеческого тела	$5 \cdot 10^{-5}$
Диаметр пылинки	$1 \cdot 10^{-4}$
Ширина человеческого ногтя	$1 \cdot 10^{-2}$
Длинный шаг человека	1
Длина пищеварительного тракта человека	10
Диаметр Земли	$1,275 \cdot 10^7$
Путь, который проходит свет в вакууме за 1 с	$2,99792458 \cdot 10^8$
Среднее расстояние от Земли до Солнца	$1,495 \cdot 10^{11}$
Световой год	$9,46 \cdot 10^{15}$
Расстояние до ближайшей неподвижной звезды	$4,02 \cdot 10^{16}$
Диаметр Галактики	$9,46 \cdot 10^{20}$
Расстояние до самого удаленного наблюдаемого объекта во Вселенной	$9,46 \cdot 10^{25}$

Обычно расстояния планет от Солнца выражают в **астрономических единицах** (а. е.), принимая за 1 а. е. большую полуось земной орбиты.  $1 \text{ а. е.} = 1,49598 \cdot 10^{11} \text{ м.}$

**Световой год** — единица межзвездных расстояний. Равен пути, который свет проходит за год, т. е.  $9,46 \cdot 10^{12}$  км (примерно десять тысяч миллиардов километров).

**Парсék<sup>1</sup>** — единица длины, применяемая в астрономии. Обозначается: "пк", прежнее обозначение: "пс".  $1 \text{ пак} = 206\,265 \text{ а. е.} = 3,263$  светового года или  $3,086 \cdot 10^{16}$  м.

Для каждой величины можно было бы выбрать свою единицу измерения независимо от других величин. Но целесообразно поступить иначе — единицы измерения нескольких величин (их называют **основными единицами**) установить независимо, а остальные — выразить через эти величины, используя физические закономерности. Например, скорость выражается через две независимые величины — длину и время.

Те единицы, которые устанавливаются не независимо, а на основании формул, связывающих их с основными единицами, называют **производными единицами**.

## 1.5. Системы единиц

**Система единиц** — совокупность основных и производных единиц некоторой системы физических величин, образованная в соответствии с принятыми принципами построения этой системы.

По мере развития различных отраслей науки и техники возникали различные системы единиц: механические МКС (метр-килограмм-секунда), СГС (сантиметр-грамм-секунда), МКГСС (метр-килограмм-сила-секунда), системы единиц для электрических (СГСЭ) и магнитных (СГСМ) измерений, система тепловых единиц, система световых единиц и др.

**Система единиц рационализованная МКС (MKS)** — система единиц механических величин с основными единицами метр, килограмм (массы), секунда. Система единиц МКС входит как составная часть в Международную систему единиц СИ.

**Система единиц СГС<sup>2</sup> (CGS)** — система единиц физических величин с основными единицами: сантиметр, грамм, секунда; принята в 1881 г. 1-м Международным конгрессом электриков в Париже в качестве системы единиц, охватывающей механику и электродинамику. Для электродинамики первоначально были приняты две СГС системы единиц: **электростатическая (СГСЭ)** и **электромагнитная (СГСМ)**. В основу построения этих систем был

<sup>1</sup> Сокращение от параллакс и секунда.

<sup>2</sup> Другое название — **физическая система единиц**.

положен закон Кулона. Единицы СГСЭ и СГСМ отличаются не только численными значениями, но и размерностями, т. к. в соотношения размерностей входит размерность скорости в разных степенях.

В 1901 г. итальянский ученый Дж. Джорджи (G. Giorgi) предложил систему единиц МКСА (MKSA). В 1958 г. Международная электротехническая комиссия установила для нее название "Система единиц Джорджи". **Система единиц МКСА (система единиц Джорджи)** — система единиц электрических и магнитных величин с основными единицами метр, килограмм (массы), секунда, ампер.

**Система единиц МКГСС (техническая система единиц) (MkGS)** — система единиц физических величин с основными единицами метр, килограмм-сила, секунда. За единицу массы принята масса тела, приобретающего ускорение  $1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$  под действием приложенной к нему силы 1 кгс (1 килограмм-сила), ее называют **технической** или **инертной единицей массы** (т. е. м.).

**Система МКСК (MKSK)** — система единиц тепловых величин с основными единицами метр, килограмм (массы), секунда, кельвин.

В 1960 г. XI Генеральной конференцией по мерам и весам (ГКМВ) в Париже принята и рекомендована всем государствам **международная система единиц СИ** (SI, System International). В нашей стране международная система единиц СИ введена с 1 января 1963 г., когда ГОСТ (Государственный стандарт СССР) "Международная система единиц" установил ее применение как предпочтительной. А в 1980 г. на основании решения Постоянной комиссии СЭВ (Совет экономической взаимопомощи — экономическая организация социалистических стран) по стандартизации она стала обязательной для всех стран — членов СЭВ.

Система СИ состоит из шести основных единиц:

1. Единица **длины**  $[L]$  — метр (м).
2. Единица **массы**  $[M]$  — килограмм (кг).
3. Единица **времени**  $[t]$  — секунда (с).
4. Единица **силы электрического тока**  $[I]$  — ампер (А).
5. Единица **термодинамической температуры**  $[T]$  — кельвин (К).
6. Единица **силы света**  $[J]$  — канделла (кд).

В 1971 г. XIV ГКМВ ввела седьмую основную единицу СИ: единицу количества вещества  $[N]$  — моль. **Моль** есть количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в  $0,012 \text{ кг}$  изотопа углерода  $^{12}\text{C}$ . При применении моля структурные элементы

должны быть специфицированы и могут быть атомами, молекулами, ионами, электронами и другими частицами или специфицированными группами частиц<sup>1</sup>. Другими словами, **моль** — количество частиц, содержащихся в 12 г изотопа углерода  $^{12}\text{C}$ , численно равное числу Авогадро  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ . Часто используется в качестве единицы вещества киломоль (кмоль) — количество частиц, содержащееся в 12 кг изотопа углерода  $^{12}\text{C}$ , ( $10^3 \cdot N_A = 6,02 \cdot 10^{26}$ ).

Дополнительными единицами СИ являются:

- единица **плоского угла** — радиан<sup>2</sup> (рад);
- единица **телесного угла** — стерadian<sup>3</sup> (ср).

В системе СИ оставлены некоторые единицы, не вошедшие в систему, но тем не менее удобные и трудно заменимые в определенных отраслях науки и техники или в быту: сутки, неделя, минута, век, диоптрия, градус Цельсия, гектар, децибел, карат, центнер, световой год, тысячелетие, парсек и ряд других.

В курсе электромагнетизма удобнее использовать одну из модификаций системы единиц СГС — абсолютную гауссову<sup>4</sup> систему единиц. Хотя и она не полностью свободна от недостатков, ее использование, по-видимому, является разумным компромиссом между установившимися традициями в использовании "привычных" механических единиц и естественным желанием иметь систему единиц, максимально отражающую фундаментальные физические идеи.

В **гауссовой системе единиц** расстояния измеряются в сантиметрах, время — в секундах, масса — в граммах. Сила при этом измеряется в производных единицах — динах ( $1 \text{ дин} = 1 \text{ г} \cdot \text{см} / \text{с}^2$ ), основанных на выборе коэффициента пропорциональности во втором законе Ньютона (см. разд. 3.6) равным единице.

Единицы электрических величин в гауссовой системе единиц равны единицам абсолютной электростатической системы СГСЭ, а единицы магнит-

<sup>1</sup> Официальное определение, принятое XIV ГКМВ в 1971 г.

<sup>2</sup> **Радян** — центральный угол, дуга которого равна радиусу. Содержит приблизительно  $57^\circ 17' 45''$ .

<sup>3</sup> **Стерadian** — телесный угол с вершиной в центре сферы радиусом  $r$ , вырезающий на поверхности сферы, описанной вокруг вершины угла, площадку, площадь которой равна квадрату радиуса сферы.

<sup>4</sup> Гауссова система единиц названа в честь немецкого ученого Карла Фридриха Га́усса (Johann Karl Friedrich Gauß, 1777—1855 гг.), впервые в 1832 г. предложившего абсолютную систему единиц с основными единицами: миллиметр, миллиграмм и секунда, и применившего эту систему для измерений магнитных величин.

Таблица 3. Некоторые системы единиц

Величина	Система единиц		
	СИ 1960	СГСМ	Гaussova
Длина $l$	1 м	1 см = $10^{-2}$ м	
Масса $m$	1 кг	1 г = $10^{-3}$ кг	
Время $t$	1 с		
Сила $F$	1 ньютон (Н) = 1 кг·м·с <sup>-2</sup>	1 дин = $10^{-5}$ Н	
Работа $A$ , энергия $E$ , теплота $Q$	1 джоуль (Дж) = 1 Н·м	1 эрг = $10^{-7}$ Дж	
Мощность $W$	1 ватт (Вт) = 1 кг·м <sup>2</sup> ·с <sup>-3</sup>		
Давление $p$	1 паскаль (Па) = 1 Н·м <sup>-2</sup>	1 дин·см <sup>-2</sup> = $10^{-1}$ Па	
Динамическая вязкость $\eta$	1 Па·с	1 пуаз (П) = $10^{-1}$ Па·с	
Кинематическая вязкость $\nu$	1 м <sup>2</sup> ·с <sup>-1</sup>	1 стокс (Ст) = $10^{-4}$ м·с <sup>-1</sup>	
Электрическая постоянная $\epsilon_0$		1	1
Электрический заряд $Q$	1 кулон (Кл) = 1 А·с	1 франклин (Фр) $\approx$ 3,33564·10 <sup>-10</sup> Кл	1 франклин (Фр) $\approx$ 3,33564·10 <sup>-10</sup> Кл
Сила тока $I$	1 ампер (А)	3,33564·10 <sup>-10</sup> А	1 биот (Би) = 10 А 3,33564·10 <sup>-10</sup> А
Электрическое напряжение $U$ , электрический потенциал $\phi$ , электродвижущая сила $E$ ,	1 вольт (В) = 1 Дж·Кл <sup>-1</sup>	10 <sup>-8</sup> В	1 эрг·Фр <sup>-1</sup> = 299,792458 В

Таблица 3 (окончание)

Величина	Система единиц		
	СИ 1960	СГСМ	СГСЭ
Электрическое сопротивление $R$	1 ом (Ом)	$10^{-9}$ Ом	Гауссова
Электрическая емкость $C$	1 фарад (Ф)	$10^9$ Ф	
Магнитная постоянная $\mu_0$			1
Напряженность магнитного поля $H$	$1 \text{ А} \cdot \text{м}^{-1}$	1 эрстед (Э) = $10^3/4\pi \text{ А} \cdot \text{м} \approx 79,6 \text{ А} \cdot \text{м}^{-1}$	
Магнитный поток $\Phi$	1 вебер (Вб) = $1 \text{ В} \cdot \text{с}$	1 максвелл (Мкс) = $10^{-8}$ Вб	
Магнитная индукция $B$	1 тесла (Тл) = $1 \text{ Вб} \cdot \text{м}^{-2}$		1 гаусс (Гс) = $10^{-4}$ Тл
Индуктивность $L$	1 генри (Гн) = $1 \text{ В} \cdot \text{А}^{-1}$		
Магнитодвижущая сила $F$	1 А		1 гильберт (Гб) = $0,795775 \text{ А}$

ных величин — единицам электромагнитной системы СГСМ. Эти системы построены по одному типу, поэтому гауссову систему единиц часто называют **симметричной системой СГС** (табл. 3). Эта симметрия делает гауссову систему единиц удобной для задач, в которых подчеркивается взаимная адекватность магнитных и электрических величин, описывающих электромагнитное поле.



**Гауссова система единиц** — система единиц электрических и магнитных величин с основными единицами: сантиметр, грамм, секунда, в которой диэлектрическая и магнитная постоянные являются безразмерными величинами, равными 1.

В 1928 г. английским физиком Дугласом Хартри (Douglas Hartree, 1897—1958 гг.) была предложена **система единиц Хартри (атомная система единиц)** — одна из **естественных систем единиц** с основными единицами: заряд и масса электрона, радиус первой боровской орбиты атома водорода ( $1 \text{ бор} = 0,529177249 \cdot 10^{-8} \text{ см}$ ), постоянная Планка. В этой системе единица энергии (хартри) —  $4,35975 \cdot 10^{-11} \text{ эрг}$ .

Формы записи основных формул электромагнетизма в системах СИ и Гауссовой см. в *приложении 1*.

### Контрольные вопросы

- ? Какие системы единиц Вы знаете?
- ? Какие единицы СИ являются основными в механике?

## 1.6. Скалярные и векторные величины

**Скалярная величина (скаляр)** — величина, каждое значение которой может быть выражено одним (действительным) числом, вследствие чего совокупность значений скаляра можно изобразить на линейной шкале.



Скалярной называют величину, характеризующуюся только числовым значением, не изменяющимся при переносе начала координат (начала отсчета времени) и при изменении координатных осей.

Длина, время, температура и т. п. — скалярные величины.

В физике очень часто приходится иметь дело с величинами, которые характеризуются не только своим числовым значением, но и направлением в пространстве. К таким величинам относятся **скорость** (см. разд. 2.7), **ускорение**

ние (см. разд. 2.8), сила (см. разд. 3.4), напряженность магнитного поля и т. п.

**Вектор** — прямолинейный отрезок определенной длины и направления.

Направленные величины в математике и физике уже давно стали изображать направленными отрезками, и для решения физических задач стали применять геометрические построения. Так, уже в самом начале XVII в. механики пользовались изображением сил в виде отрезков (рис. 1) и **правилом параллелограмма** для определения равнодействующей.



Вектор — упорядоченная совокупность трех чисел (представляющих собой физические величины), зависящих от системы координат и изменяющихся при повороте системы отсчета так же, как изменяются координаты точки.

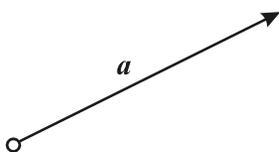


Рис. 1. На чертеже вектор изображается стрелкой

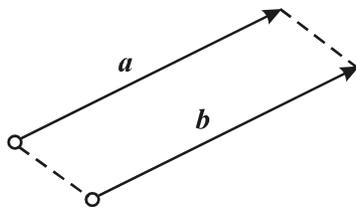


Рис. 2. Равные векторы

Векторы изображают векторные величины: силу, скорость, ускорение и т. п. При этом не следует путать вектор и изображаемую им векторную величину. Строго говоря, сила не геометрический вектор, а векторная величина.

**Нулевым вектором** является точка.

Два вектора называют **равными**, если они имеют одинаковые длины и одинаковые направления. При этом два вектора считаются одинаково направленными, если они расположены на одной прямой или на параллельных прямых и направлены в одну сторону. С изменением направления на противоположное изменяется знак вектора.



Два вектора  $a$  и  $b$  считаются равными, если один из них путем параллельного переноса можно совместить с другим так, что совпадут их начала и концы (рис. 2).

**Связанный (приложенный) вектор** — вектор, точка приложения которого определена в пространстве и не может быть перенесена. Так, в движущейся жидкости скорость ее частицы является приложенной векторной величиной.

**Скольльзящий вектор** — вектор, точка приложения которого может быть перенесена по линии его действия (т. е. по прямой, на которой расположен вектор). Примером такой величины является сила, приложенная к твердому телу: точку приложения такой силы можно переносить вдоль линии ее действия, но нельзя смещать с этой линии, т. к. в этом случае действие силы на тело изменится.

**Свободный вектор** — вектор, точка приложения которого может быть перенесена в любую точку пространства. Так, все точки поступательно движущегося твердого тела имеют одинаковую по величине и по направлению скорость. Эта скорость и может рассматриваться как свободная векторная величина, называемая **скоростью тела**.

Векторы называют **коллинеарными**, если они параллельны одной прямой. Нулевой вектор считается коллинеарным любому вектору.

Векторы называют **компланарными**, если они параллельны одной плоскости. Нулевой вектор считается компланарным любой системе компланарных между собой векторов.

**Модулем** вектора называют его длину при условии, что выбрана определенная единица измерения длин. *Равные векторы* имеют равные модули. Векторы  $+a$  и  $-a$  имеют один и тот же модуль.

Модуль вектора  $a$  обозначается той же буквой, поставленной между двумя вертикальными черточками, или той же буквой, без выделения жирным шрифтом:

$$|a| = a.$$

**Ортом** данного вектора называют вектор, который направлен одинаково с данным вектором и имеет модуль, равный единице. Равные векторы имеют равные орты.

Орт вектора  $a$  обозначается  $a^0$ :

$$|a^0| = 1.$$

**Углом  $\varphi$  между двумя векторами  $a$  и  $b$**  называют меньшую часть плоскости, ограниченную двумя лучами, исходящими из одной точки и направленными одинаково с данными векторами (рис. 3).

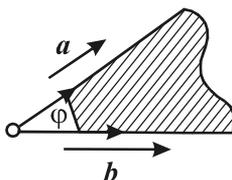


Рис. 3. Угол между векторами

### 1.6.1. Законы сложения и вычитания векторов

Правило сложения двух векторов — правило **параллелограмма** (или **треугольника**): вектор  $b$  откладывается от конца вектора  $a$ , и сумма  $a + b$  определяется как вектор, соединяющий начало  $a$  с концом  $b$ .

Сумма векторов не изменяется при перестановке слагаемых, т. е. сложение **коммутативно**. Кроме того, оно обладает свойством **ассоциативности**:

$$(a + b) + c = a + (b + c). \quad (2)$$

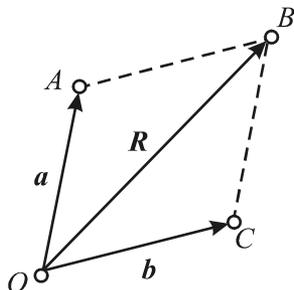


Рис. 4. Правило параллелограмма для сложения двух векторов

Правило сложения нескольких векторов — **правило многоугольника** (суммой нескольких векторов является вектор, соединяющий начало первого слагаемого вектора с концом последнего при условии, что начало каждого последующего вектора совмещено с концом предыдущего) — рис. 5.

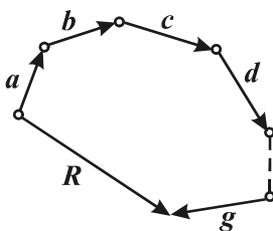


Рис. 5. Правило многоугольника для сложения нескольких векторов

**Закон сочетательности** — сумма не изменится, если любую группу последовательных слагаемых заменить их суммой (рис. 6).

Заменяя два последовательных слагаемых их суммой, можно любое число последовательных слагаемых заменить их суммой (рис. 7).

**Закон переместительности** — от перестановки слагаемых сумма не изменится ( $a + b = b + a$ , рис. 8).

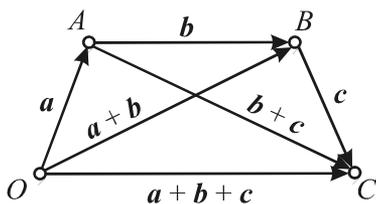


Рис. 6. К закону сочетательности

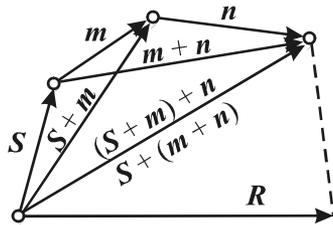


Рис. 7. К закону сочетательности

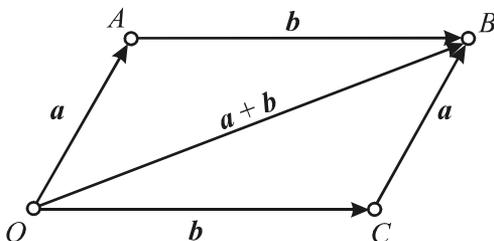


Рис. 8. К закону переместительности

**Вычитание векторов** — операция, обратная сложению векторов: при помощи ее по сумме  $(a + b)$  и одному из слагаемых  $b$  находится второе слагаемое  $(a + b) - b = a$  (рис. 8).

Разложение вектора на составляющие осуществляется по **правилу параллелограмма**: вектор  $(a + b)$  можно разложить по произвольным осям на векторы  $a$  и  $b$  (рис. 8).



Вектором называют величину, характеризуемую численным значением, направлением в пространстве и складывающуюся с другой, себе подобной величиной, геометрически.

### Контрольные вопросы

- ? Какие величины называют скалярными, а какие векторными?
- ? Чем отличается вектор от скаляра?
- ? Приведите примеры векторов и скаляров.
- ? Какие правила сложения векторов Вы знаете?
- ? Как производят сложение векторов, направленных под углом один к другому? Как производят вычитание векторов?

- ? Как производят сложение нескольких векторов?
- ? Как определяют разность двух векторов?
- ? Какие векторы называют коллинеарными?
- ? Как производят сложение и вычитание коллинеарных векторов?

## 1.7. Умножение вектора на скаляр

Если  $\lambda$  — действительное число, то вектор  $\lambda \mathbf{a}$  получается из вектора  $\mathbf{a}$  растяжением в  $\lambda$  раз (при отрицательном  $\lambda$  происходит растяжение в  $|\lambda|$  раз и изменение направления на противоположное).



**Произведением вектора и скаляра** называют новый вектор, который имеет:

- модуль, равный произведению модуля умножаемого вектора на абсолютную величину скаляра;
- направление, одинаковое с умножаемым вектором, если скаляр положительный, и противоположное, если скаляр отрицательный.

### 1.7.1. Законы умножения вектора на скаляр

**Закон коммутативности (переместительности)** — произведение не изменяется при перестановке сомножителей.

**Закон ассоциативности (сочетательности) для скалярных множителей** — последовательное умножение вектора на несколько скалярных множителей равносильно умножению этого вектора на произведение этих множителей.

**Закон дистрибутивности (двойкой распределительности)** — умножение суммы векторов на скаляр, а также умножение скаляров на вектор можно производить почленно (рис. 9), т. е.:

$$(\mathbf{a} + \mathbf{b})\lambda = \mathbf{a}\lambda + \mathbf{b}\lambda ; \quad (3)$$

$$(\lambda + \mu)\mathbf{a} = \lambda\mathbf{a} + \mu\mathbf{a} . \quad (4)$$

**Деление вектора на скаляр** определяется как умножение вектора на число, обратное скалярной величине.

#### Контрольные вопросы

- ? Как производится умножение вектора на скаляр?
- ? Как производится деление вектора на скаляр?

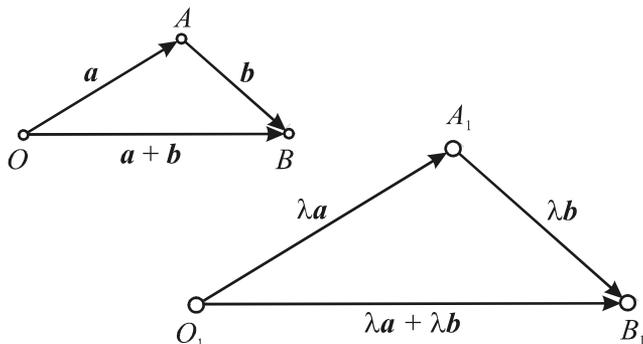


Рис. 9. К закону двойкой распределительности

## 1.8. Произведение векторов. Двойные произведения

**Скалярное произведение** двух векторов обозначается как  $(ab)$  и определяется как **число**, равное  $|a||b|\cos\varphi$ , где  $|a|$ ,  $|b|$  — длины соответствующих векторов, а  $\varphi$  — угол между ними (рис. 10).

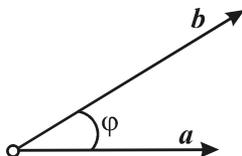


Рис. 10. К скалярному произведению двух векторов

### 1.8.1. Законы скалярного и векторного умножения векторов

**Закон коммутативности (переместительности)** — скалярное произведение не изменяется от перестановки множителей.

**Закон дистрибутивности (распределительности)** — скалярное умножение вектора на сумму векторов можно производить почленно.

**Закон ассоциативности (сочетательности) относительно скалярных множителей** — скалярное произведение не изменится, если скалярный множитель вынести за скобки.

**Векторное произведение**  $[ab]$ , или  $a \times b$ , определяется как **вектор**, имеющий длину  $|a||b|\sin\varphi$ , перпендикулярный к плоскости векторов  $a$ ,  $b$  и на-

правленный так, чтобы тройка  $a, b, [ab]$  была **правой**. Векторы **правой** (левой) **тройки** расположены по отношению друг к другу так же, как большой, указательный и средний пальцы правой (левой) руки. Правая тройка переходит в левую при обращении направления одного или всех векторов тройки.



Векторным произведением двух векторов  $a$  и  $b$  называют третий вектор  $N$ , который (рис. 11):

- имеет модуль, численно равный площади параллелограмма, построенного на перемножаемых векторах;
- направлен перпендикулярно к перемножаемым векторам в ту сторону, откуда наименьший поворот первого вектора, совмещающий его направление с направлением второго вектора, виден происходящим против хода часовой стрелки.

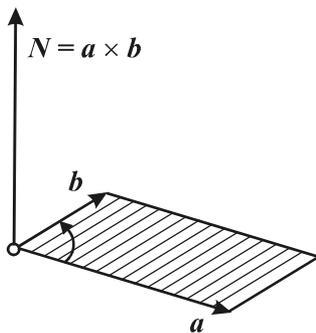


Рис. 11. Векторное произведение двух векторов

При перестановке сомножителей скалярное произведение не изменяется, а векторное изменяет знак. Скалярное произведение обращается в 0 для перпендикулярных (ортогональных) векторов, а векторное — для параллельных (коллинеарных) из-за величины  $\sin\varphi$ . Имеет место свойство линейности скалярного и векторного произведений по одному из аргументов (любому):

$$(a(b+c)) = (ab) + (ac), \quad (a(\lambda b)) = \lambda(ab); \quad (5)$$

$$[a(b+c)] = [ab] + [ac], \quad [a\lambda b] = \lambda[ab]. \quad (6)$$

Ясный геометрический смысл имеет **смешанное произведение** ( $a[bc]$ ). Это число, равное объему параллелепипеда, построенного на тройке векторов  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , и взятое со знаком "плюс" или "минус" в зависимости от того, является ли эта тройка правой или левой. Смешанное произведение не изменяется при циклической (круговой) перестановке его сомножителей:

$$a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow a . \quad (7)$$

Смешанное произведение обращается в 0, если эти векторы лежат в одной плоскости (компланарны).



# ГЛАВА 2

## Кинематика

### 2.1. Кинематика материальной точки

**Кинематика** — раздел механики, изучающий геометрические свойства движения материальных тел в пространстве и времени без рассмотрения вызывающих это движение взаимодействий.

Одной из основных задач кинематики материальной точки и твердого тела является описание (с помощью математических уравнений, графиков или таблиц) движений, совершаемых точками или телами по отношению к данной системе отсчета.



**Кинематикой** называют раздел механики, в котором движение тел рассматривается без выяснения причин этого движения.

---

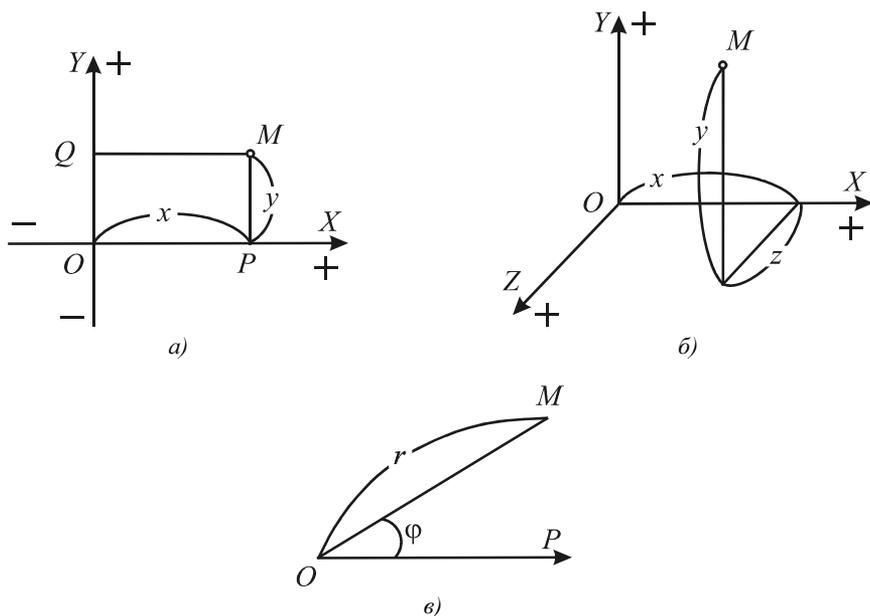
### 2.2. Системы координат

**Координаты** (от лат. *co* — совместно и *ordinatus* — упорядоченный, определенный) — числа, заданием которых определяется положение точки на плоскости, на поверхности или в пространстве (рис. 12).

**Прямоугольные (декартовы) координаты точки на плоскости** — снабженные знаками "+" или "-" расстояния  $QM = OP = x$  (**абсцисса**) и  $PM = OQ = y$  (**ордината**) точки  $M$  от двух взаимно перпендикулярных прямых  $OX$  и  $OY$  (**осей координат**). Точку  $O$  называют **началом координат**.

**Прямоугольной системой координат в пространстве (декартовыми координатами)** называют тройку взаимно перпендикулярных осей, пересекаю-

щихся в одной точке  $O$ , именуемой **началом координат**, относительно которых положение точки  $M$  определяется тремя координатами:  $x$  (**абсцисса**),  $y$  (**ордината**) и  $z$  (**апplikата**). Координатные оси обычно обозначают буквами  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  и называют соответственно **осью абсцисс**, **осью ординат**, **осью апplikат**.



**Рис. 12.** Прямоугольные (декартовы) координаты на плоскости (а), в пространстве (б), полярные координаты на плоскости (в)



Систему **прямоугольных координат** в пространстве определяют 3 взаимно перпендикулярные плоскости, относительно которых положение точки определяется 3-мя координатами.

**Полярные координаты точки на плоскости** — **радиус-вектор** этой точки (расстояние  $OM = r$  от фиксированной точки  $O$  (**полюса**)) и угол  $POM = \varphi$  (**полярный угол**) между  $OM$  и **полярной осью**  $OP$ <sup>1</sup>.

В пространстве аналогом полярных координат служат цилиндрические координаты и сферические координаты.

<sup>1</sup> Более подробно полярные координаты обычно изучаются в курсе высшей математики.

**Цилиндрические координаты** (рис. 13) точки  $M$  — три числа  $r$ ,  $\varphi$ ,  $z$ , связанные с декартовыми координатами  $x$ ,  $y$ ,  $z$  этой точки формулами:

$$x = r \cos \varphi ; \quad (8)$$

$$y = r \sin \varphi ; \quad (9)$$

$$z = z . \quad (10)$$

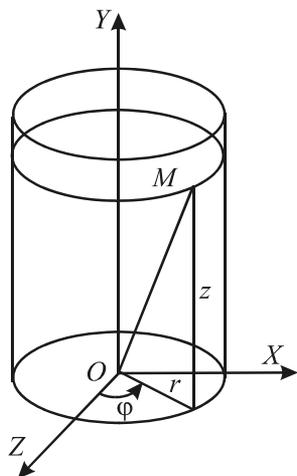


Рис. 13. Цилиндрические координаты

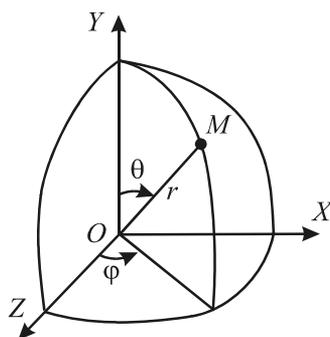


Рис. 14. Сферические координаты

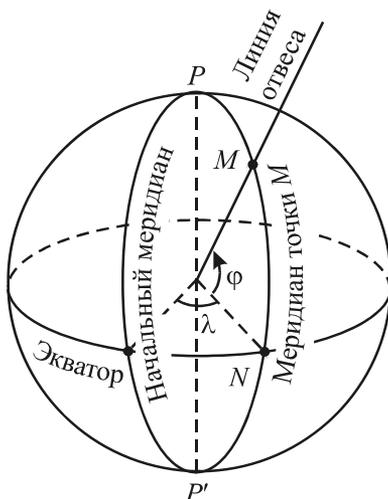
**Сферические координаты** (рис. 14) точки  $M$  — три числа  $r$ ,  $\theta$ ,  $\varphi$ , связанные с декартовыми координатами  $x$ ,  $y$ ,  $z$  этой точки формулами:

$$x = r \sin \theta \cos \varphi ; \quad (11)$$

$$y = r \sin \theta \sin \varphi ; \quad (12)$$

$$z = r \cos \theta . \quad (13)$$

**Географические координаты** (рис. 15) — угловые величины, называемые долготой и широтой, определяющие положение точек на сфере, в том числе на земной поверхности. Под **долготой** понимают двугранный угол  $\lambda$  между плоскостью нулевого (Гринвичского) меридиана и плоскостью данного меридиана. Долготы от  $0$  до  $180^\circ$  к востоку от нулевого меридиана называют восточными, к западу — западными. Под **широтой** понимают угол  $\varphi$ , составленный отвесной линией, проходящей через данную точку, с плоскостью экватора, отсчитываемый от  $0$  до  $90^\circ$  в обе стороны от экватора.



**Рис. 15.** Географические координаты точки  $M$ : широта  $\varphi$  (угол  $MCN$ ); долгота  $\lambda$  (угол  $OCN$ );  $P$  и  $P'$  — Северный и Южный полюсы Земли

**Меридиан<sup>1</sup> географический** — линия сечения поверхности земного шара плоскостью, проведенной через какую-либо точку земной поверхности и ось вращения Земли. **Начальный меридиан** — меридиан, от которого ведется счет долготы географической; в международной практике за начальный меридиан принят Гринвичский.

**Параллель<sup>2</sup> земная** (в географии) — линия сечения поверхности земного шара плоскостью, параллельной плоскости экватора.

Различают координаты геодезические и астрономические. **Геодезические координаты** определяются проходящей через данную точку нормалью к поверхности земного эллипсоида, **астрономические координаты** — отвесной линией в данной точке<sup>3</sup>.

### Контрольные вопросы

- ? Какие системы координат Вы знаете?
- ? Что такое декартова система координат?

<sup>1</sup> От лат. *meridianus* — полуденный.

<sup>2</sup> От греч. *parallelos*, буквально — идущий рядом.

<sup>3</sup> Более подробно астрономические координаты обычно изучаются в курсе астрономии средней школы.

## 2.3. Системы отсчета

Механическое движение относительно. Движение одного и того же тела относительно разных тел оказывается различным. Бессмысленно говорить о механическом движении, не выбрав тела, с которыми связана система координат. Для описания движения тела нужно указать, по отношению к какому телу рассматривается движение. Это тело называют **телом отсчета**.

*Система координат*, связанная с телом отсчета, и часы для отсчета времени образуют **систему отсчета**, позволяющую определять положение движущегося тела в любой момент времени.



**Система отсчета** — совокупность системы координат и часов, связанных с телом, по отношению к которому изучается движение (или равновесие) каких-либо других материальных точек или тел.

### Контрольные вопросы

- ? Что такое тело отсчета?
- ? Что называют системой отсчета?
- ? Для чего вводится система отсчета?
- ? Как определяется положение материальной точки?

## 2.4. Движение в механике

Окружающий нас материальный мир представляет собой различные виды движущейся материи, которая всегда находится в состоянии непрерывного движения, изменения, развития. Движение, как постоянное изменение, присуще материи в целом и каждой мельчайшей частице. При всех разнообразных переходах одних форм движения в другие точно соблюдается **закон вечности материи и ее движения**.

Ни один вид материи и ни одна форма движения не могут быть получены из ничего и превращены в ничто.

**Движение в механике** — перемещение отдельных материальных точек или систем материальных точек в пространстве (относительно заранее выбранной системы отсчета) с течением времени.

Движение тела называют **вращательным** (относительно оси вращения), если точки тела (за исключением точек, лежащих на оси вращения) описывают концентрические окружности вокруг оси (точки) вращения (см. разд. 9.3).

Движение тела называют **поступательным**, если любая прямая, проведенная в теле, остается при движении этого тела параллельной самой себе.

**Произвольное движение** тела можно представить как *сочетание поступательных и вращательных движений*.



**Механическим движением** тела называют изменение его положения в пространстве относительно других тел, выбранных в качестве *тел отсчета*, с течением времени.

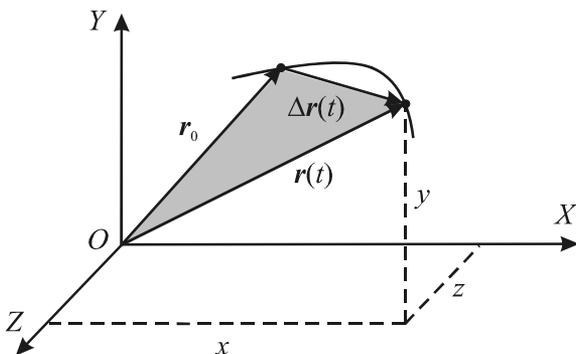
### Контрольные вопросы

- ? Охарактеризуйте механическое движение.
- ? Дайте определения поступательного и вращательного движений твердого тела. Приведите примеры этих движений.

## 2.5. Траектория, путь

Положение материальной точки в пространстве в любой момент времени (**закон движения**) можно определять либо с помощью зависимости ее координат от времени  $x = x(t)$ ,  $y = y(t)$ ,  $z = z(t)$  (**координатный способ**), либо задавая зависимость от времени радиус-вектора  $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$ , проведенного из начала координат до данной точки (**векторный способ**) (рис. 16).

Материальная точка в процессе своего движения описывает некую линию, называемую траекторией.



**Рис. 16.** Определение положения точки с помощью координат и радиус-вектора  $\mathbf{r}(t)$ .

$\mathbf{r}_0$  — радиус-вектор положения точки в начальный момент времени

**Траектория** — кривая, которую описывает радиус-вектор координат тела с течением времени (кривая  $BC$  на рис. 18).



Траектория движущейся точки — линия, образовавшаяся в пространстве совокупностью последовательных положений, занимаемых точкой в процессе ее движения.

**Пройденный путь** — скалярная величина  $l$ , равная расстоянию, пройденному материальной точкой по траектории, т. е. это длина ее траектории (рис. 17).



**Рис. 17.** Пройденный путь  $l$  при криволинейном движении тела: Старт (Межфакультетский учебный центр СПбГУ — Средний пр., д. 41/43) и Финиш (главное здание СПбГУ — Университетская наб., д. 7/9) — начальная и конечная точки пути

### Контрольные вопросы

- ? Дайте определение траектории.
- ? Что такое путь?
- ? Дайте определение пути при произвольном движении материальной точки.

## 2.6. Перемещение

**Перемещение** (материальной точки за некоторый промежуток времени) — вектор  $S$ , соединяющий начальное положение материальной точки ( $B$ ) с ее конечным положением ( $C$ ) (рис. 18).

Вектор перемещения направлен вдоль хорды траектории точки.

Движение тел можно описывать в различных *системах отсчета* (см. разд. 2.2). С точки зрения кинематики все системы отсчета равноправны. Однако кинематические характеристики движения, такие как перемещение, *траектория* (см. разд. 2.4), *скорость* (см. разд. 2.7), в разных системах оказываются раз-

личными. Величины, зависящие от выбора системы отсчета, в которой производится их измерение, называют **относительными**.

В кинематике действует **закон независимости движений**: если материальная точка одновременно участвует в нескольких движениях, то результирующее перемещение точки равно векторной сумме перемещений, совершаемых ею в каждом из движений.

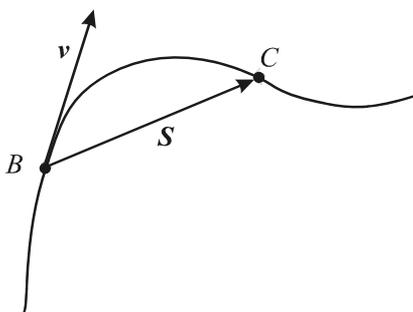


Рис. 1.18. Криволинейное движение

Пример:

Пусть имеются две системы отсчета. Будем считать систему  $XOY$  неподвижной, а система  $X'O'Y'$  пусть движется поступательно по отношению к системе  $XOY$  с постоянной скоростью  $v_0$ . Система  $XOY$  может быть, например, связана с Землей, а система  $X'O'Y'$  — с движущимся по рельсам вагоном электропоезда (рис. 19).

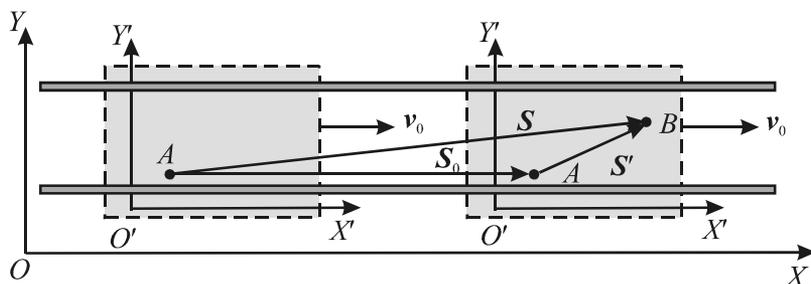


Рис. 19. Сложение перемещений относительно разных систем отсчета (вагон электропоезда, вид сверху)

Пусть контролер, проверяющий билеты у пассажиров электропоезда, прошел по вагону от одного пассажира к другому, т. е. из точки  $A$  в точку  $B$ . Тогда его перемещение относительно вагона можно изобразить вектором  $S'$ , а перемещение вагона относительно Земли изобразится вектором  $S_0$ . Из рис. 19

видно, что перемещение контролера относительно Земли изобразится вектором  $\mathbf{S}$ , представляющим собой векторную сумму векторов  $\mathbf{S}_0$  и  $\mathbf{S}'$ :

$$\mathbf{S} = \mathbf{S}_0 + \mathbf{S}' . \square \quad (14)$$

Пройденный путь и длина вектора перемещения совпадают только при движении тела по прямой в одном направлении.

В случае достаточно малого промежутка времени  $\Delta t$  пройденный телом путь  $\Delta l$  почти совпадает с модулем вектора перемещения  $\Delta \mathbf{S}$ . При движении тела по криволинейной траектории модуль вектора перемещения всегда меньше пройденного пути (рис. 18 и 17).

### Контрольные вопросы

- ? Что такое перемещение?
- ? Чем отличается перемещение от пути? Каковы их единицы измерения в СИ?
- ? Как производят сложение перемещений?

## 2.7. Скорость

Часто под скоростью понимают величину *пути*, проходимого за единицу времени. В этом случае скорость рассматривается как величина *скалярная*. Если за равные, сколь угодно малые промежутки времени тело проходит одинаковые пути, движение называют **равномерным**. В этом случае скорость, которой обладает тело в каждый момент времени, можно вычислить, разделив путь  $l$  на время  $t$ , затраченное на прохождение этого пути:

$$v = \frac{l}{t} . \quad (15)$$

В физике под **скоростью** понимают *векторную величину*, характеризующую не только быстроту перемещения тела по траектории, но и направление, в котором движется тело в каждый момент времени.

Как уже было указано, для строгости изложения вместо термина "тело" будем пользоваться термином "материальная точка", хотя во многих случаях все сказанное о материальной точке будет применимо и к телам (по крайней мере, в случае *поступательного движения абсолютно твердого тела*).

**Равномерное прямолинейное движение** — такое движение, при котором материальная точка движется по прямой, и в любые равные промежутки времени совершает одинаковые перемещения.

Для кинематического описания равномерного прямолинейного движения координатную ось  $OX$  удобно расположить по линии движения. В этом случае положение материальной точки при равномерном движении определяется заданием одной координаты  $x(t)$ . Вектор перемещения и вектор скорости всегда направлены параллельно координатной оси  $OX$ . Поэтому перемещение и скорость при прямолинейном движении можно спроецировать на ось  $OX$  и рассматривать их проекции как алгебраические величины.

Если в некоторый момент времени  $t_1$  материальная точка находилась в точке с координатой  $x_1$ , а в более поздний момент  $t_2$  — в точке с координатой  $x_2$ , то проекция  $\Delta S$  перемещения на ось  $OX$  за время  $\Delta t = t_2 - t_1$  равна:

$$\Delta S = x_2 - x_1. \quad (16)$$

Эта величина может быть и положительной, и отрицательной в зависимости от направления, в котором двигалась материальная точка. При равномерном движении вдоль прямой модуль перемещения совпадает с пройденным путем.

**Скоростью равномерного прямолинейного движения** называют отношение:

$$v = \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \text{const}. \quad (17)$$

Если  $v > 0$ , то материальная точка движется в сторону положительного направления оси  $OX$ , при  $v < 0$  материальная точка движется в противоположном направлении.

Зависимость координаты  $x$  от времени  $t$  (*закон движения*) выражается при равномерном прямолинейном движении линейным уравнением:

$$x(t) = x_0 + vt, \quad (18)$$

где  $v = \text{const}$  — скорость движения материальной точки;  $x_0$  — координата точки, в которой находилась материальная точка в момент времени  $t = 0$ .

На графике закон движения  $x(t)$  (18) изображается прямой линией. Примеры таких графиков представлены на рис. 20.

На графике движения скорость материальной точки может быть геометрически определена как отношение сторон треугольника  $ABC$  (рис. 20):

$$v = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{|BC|}{|AC|}. \quad (19)$$

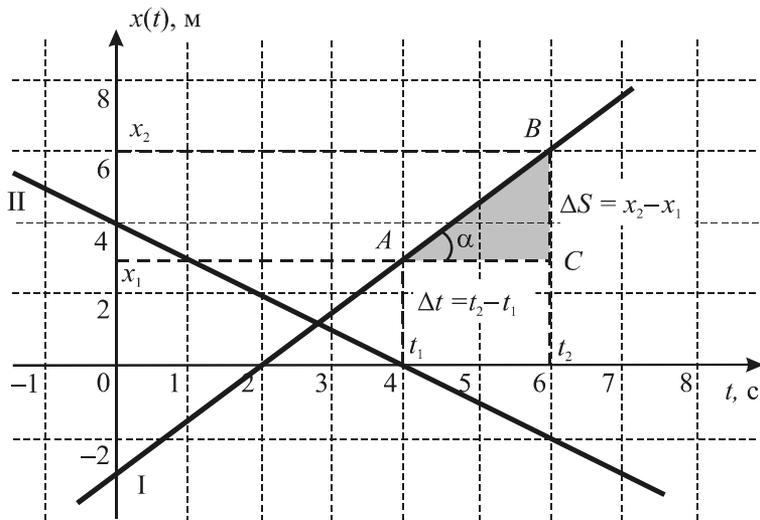


Рис. 1.20. Графики (I и II) равномерного прямолинейного движения

Чем больше угол  $\alpha$ , который образует прямая с осью времени, т. е. чем больше наклон графика (**крутизна**), тем больше скорость тела. Иногда говорят, что скорость тела равна тангенсу угла наклона  $\alpha$  прямой  $x(t)$ . С точки зрения математики это утверждение не вполне корректно, т. к. стороны  $BC$  и  $AC$  треугольника  $ABC$  имеют разные размерности: сторона  $BC$  измеряется в единицах длины, а сторона  $AC$  — в единицах времени. Правильнее говорить не о тангенсе угла наклона, а об **угловом коэффициенте**, численно равном тангенсу. Аналогичным образом, для движения, изображенного на рис. 20 прямой II:  $x_0 = 4$  м,  $v = -1$  м·с<sup>-1</sup>.

На рис. 21 закон движения  $x(t)$  тела изображен с помощью отрезков прямых линий. В математике такие графики называют **кусочно-линейными**.

Следует отметить, что при кусочно-линейном законе прямолинейного движения материальной точки пройденный путь  $l$  не совпадает с перемещением  $S$ . Например, для закона движения, изображенного на рис. 21, перемещение материальной точки в интервале времени от 0 до 7 с равно нулю ( $S = 0$ ). Однако за это время тело прошло путь  $l = 8$  м.

Разобьем произвольную траекторию на бесконечно малые участки длины. Каждому из участков сопоставим бесконечно малое перемещение  $dS$ . Разделив это перемещение на соответствующий промежуток времени  $dt$ , получим вектор **мгновенной скорости** в данной точке траектории:

$$v_{\text{мгн}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{dS}{dt}. \quad (20)$$

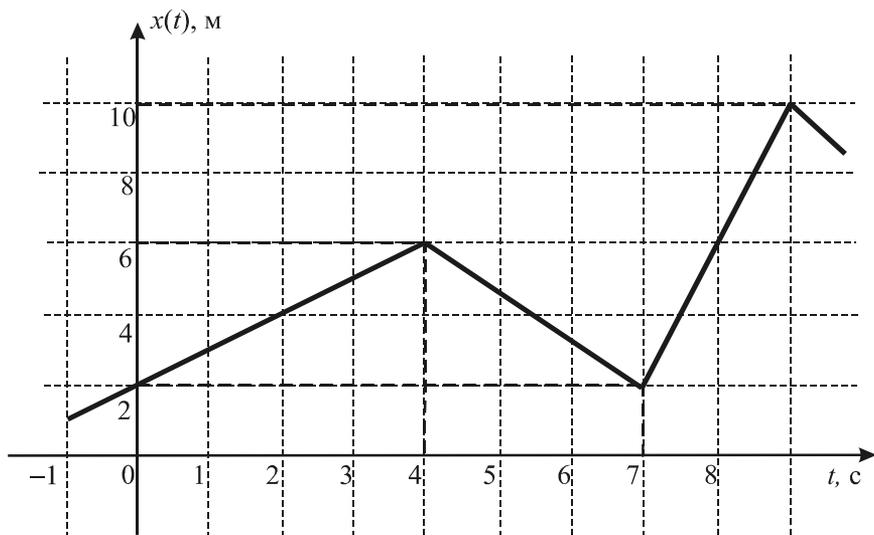


Рис. 21. Кусочно-линейный закон движения

В случае, когда одна из систем отсчета движется относительно другой поступательно (как на рис. 19) с постоянной скоростью  $v_0$ , выражение (14) принимает вид:

$$S = v_0 \Delta t + S' . \quad (21)$$

Если рассматривать перемещения за малый промежуток времени  $\Delta t$ , то, разделив обе части уравнения (21) на  $\Delta t$  и затем, перейдя к пределу при  $\Delta t \rightarrow 0$ , получим:

$$v = v_0 + v' , \quad (22)$$

где  $v$  — скорость материальной точки в "неподвижной" системе отсчета  $XOY$  (рис. 19),  $v'$  — скорость материальной точки в "движущейся" системе отсчета  $X'O'Y'$ .

Скорости  $v$  и  $v'$  называют соответственно **абсолютной** и **относительной скоростями**, скорость  $v_0$  — **переносной скоростью**.



Абсолютная скорость материальной точки  $v$  равна векторной сумме ее относительной скорости  $v'$  и переносной скорости  $v_0$  подвижной системы отсчета — **классический закон сложения скоростей**.

В случае, когда векторы относительной скорости  $v'$  и переносной скорости  $v_0$  параллельны друг другу, закон сложения скоростей можно записать в скалярной форме:

$$v = v_0 + v'. \quad (23)$$

В этом случае все движения происходят вдоль одной прямой линии (например, оси  $OX$ ). Скорости  $v$ ,  $v_0$  и  $v'$  нужно рассматривать как проекции абсолютной, переносной и относительной скоростей на ось  $OX$ . Они являются величинами алгебраическими и, следовательно, им нужно приписывать определенные знаки ("плюс" или "минус") в зависимости от направления движения.



Величина скорости материальной точки — первая производная ее перемещения по времени.

Из рис. 22 видно, что фактически скорость есть производная радиуса-вектора материальной точки во времени. Перемещение  $\Delta S$  (или изменение радиус-вектора  $\Delta r$ ) за малый промежуток времени  $\Delta t$  совпадает с бесконечно малым элементом траектории (рис. 23). Следовательно, вектор  $v$  направлен по касательной к траектории.

$$v = \lim \left( \frac{\Delta S}{\Delta t} \right) \Big|_{\Delta t \rightarrow 0} = \lim \left( \frac{\Delta r}{\Delta t} \right) \Big|_{\Delta t \rightarrow 0} = \frac{dr}{dt}. \quad (24)$$

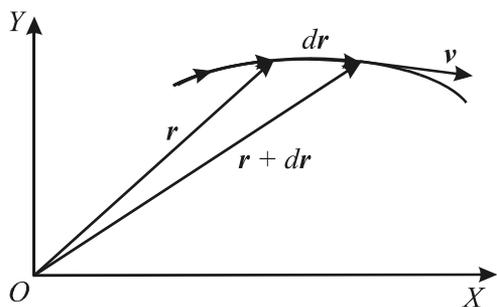


Рис. 22. К вектору скорости

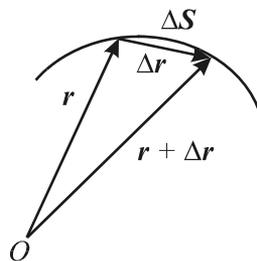


Рис. 23. К вектору скорости



**Скорость** материальной точки — вектор  $v$ , характеризующий направление и быстроту перемещения материальной точки относительно тела отсчета.

Найдем модуль выражения (24), т. е. модуль скорости  $v$ :

$$v = |\mathbf{v}| = \left| \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \right) \right| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left( \frac{|\Delta \mathbf{r}|}{\Delta t} \right). \quad (25)$$

В системе СИ скорость измеряется в  $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$ , в СГС — в  $\text{см}\cdot\text{с}^{-1}$ . Внесистемные единицы —  $\text{км}\cdot\text{ч}^{-1}$ , мили в час, узел (применяется для определения скорости судов, 1 узел = 1 морская миля в час =  $1,852 \text{ км}\cdot\text{ч}^{-1} = 0,5144 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ), отношение скорости движения тела в среде к скорости звука в той же среде (**число Маха**<sup>1</sup> — М-число, применяется в аэродинамике и авиации, 1 М — это скорость звука в воздухе на данной высоте полета, скорость меньше скорости звука — **дозвуковая**, от 1 до 3—4 М — **сверхзвуковая** скорость, от 3—4 до 25 М — **гиперзвуковая** скорость, 25 М — **первая космическая скорость** (см. разд. 5.5)) или отношение скорости движения тела к скорости света (например, для элементарных частиц см. том "Атомная и ядерная физика" данного курса) и т. п.

Примеры типичных скоростей см. в табл. 4, рекордных скоростей — в табл. 5. Максимальные скорости некоторых летательных аппаратов приведены в приложении 1.

### Контрольные вопросы

- ? Что такое скорость материальной точки (словами и математически)?
- ? Что такое мгновенная скорость?
- ? Как направлена скорость при прямолинейном движении? при криволинейном движении?
- ? В каких единицах измеряется скорость? Какова единица скорости в системе СИ?
- ? Как записывается уравнение скорости в проекциях на координатную ось?
- ? Как записывается уравнение движения?
- ? Напишите уравнения равномерного движения и постройте графики пути и скорости.
- ? Как производят сложение скоростей?

<sup>1</sup> Названо по имени австрийского физика Эрнста Маха (Ernst Mach, 1838—1916 гг.), открывшего и исследовавшего ударные волны. О скорости звука см. том "Колебания и волны" данного курса.

## 2.8. Ускорение

**Ускорение** — векторная величина, характеризующая изменение скорости точки за промежуток времени:  $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ .

Поскольку скорость является вектором, то и ускорение является вектором. В общем случае вектор ускорения направлен в сторону вогнутости траектории точки и лежит в соприкасающейся плоскости (если траектория — плоская кривая, то в плоскости этой кривой).

**Вектор ускорения  $a$**  характеризует быстроту и направление изменения скорости материальной точки относительно тела отсчета.

**Мгновенным ускорением** (или просто **ускорением**)  $a$  тела называют предел отношения малого изменения скорости  $\Delta v$  к малому промежутку времени  $\Delta t$ , в течение которого происходило изменение скорости.



Ускорение материальной точки — это первая производная ее скорости по времени:

$$a = \lim \left( \frac{\Delta v}{\Delta t} \right)_{\Delta t \rightarrow 0} = \frac{dv}{dt}. \quad (26)$$

**Ускорение свободного падения (ускорение силы тяжести)** — ускорение, которое приобретает свободная материальная точка под действием *силы тяжести*. Такое ускорение имел бы центр тяжести любого тела при падении тела на Землю с небольшой высоты в безвоздушном пространстве (см. разд. 5.2).

### Контрольные вопросы

- ? Что называют ускорением?
- ? Сформулируйте определение единицы ускорения в системе СИ.

## 2.9. Равноускоренное поступательное движение

**Переменное или неравномерное движение** — движение, при котором вектор скорости изменяется во времени.

В общем случае **равноускоренным (равнопеременным) движением** называют такое движение, при котором вектор ускорения  $a$  остается неизменным

по модулю и направлению. Примером такого движения является движение камня, брошенного под некоторым углом к горизонту (без учета сопротивления воздуха).

Еще Галилей рассматривал движение камня, брошенного в горизонтальном направлении, как состоящее из "*равномерно беспрепятственного движения*" по горизонтали и "*равномерно ускоренного движения*" вниз, вызванного силой тяжести. Таким образом, Галилей ввел новый закон — **принцип сложения движений**.

Это позволило Галилею решить основную задачу баллистики: он установил вид траектории полета тела, брошенного под углом к горизонту. Оказалось, что при отсутствии сопротивления воздуха тело будет двигаться по параболе (см. разд. 5.2). Галилей писал, что и до него было замечено, что брошенные тела или снаряды описывают кривую, но до него никто не указал, что эта линия является параболой. Он доказал, что если бросать одно и то же тело под разными углами, то наибольшую дальность полета можно достичь при угле, равном половине прямого ( $45^\circ$ ).

Так пришло осознание ценности теории — наука стала обладать предсказательной силой. "*Только теперь, — написал Галилей, — открылись двери для новых исследований, которые могут иметь результатом множество новых удивительных заключений и выводов, если в будущем этим предметом займутся другие ученые... будут проложены пути для создания новой обширной и чрезвычайно важной науки, начальные основы которой заложены в настоящей работе и погрузиться в глубокие тайны которой предоставляется пытливым умам последующих ученых*".

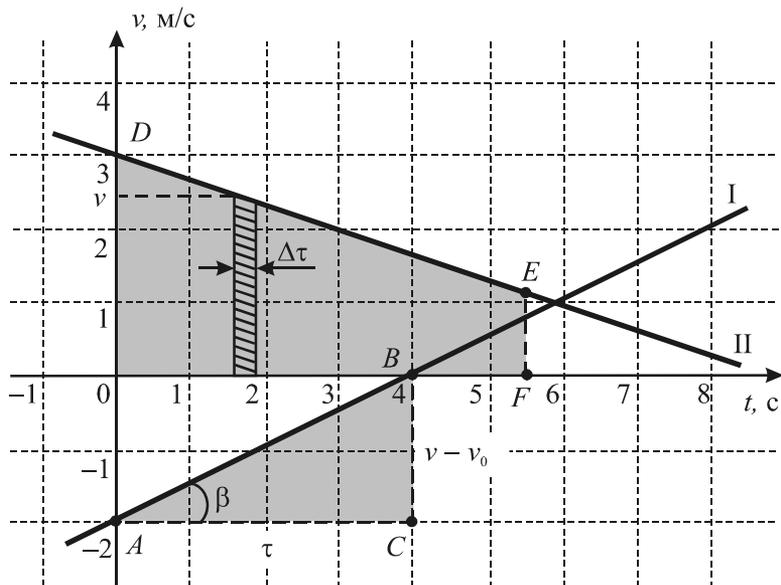
При равноускоренном прямолинейном движении скорость материальной точки определяется формулой:

$$v = v_0 + at, \quad (27)$$

где  $v_0$  — скорость материальной точки при  $t=0$  (**начальная скорость**),  $a = \text{const}$  — ускорение. На графике скорости  $v(t)$  эта зависимость изображается прямой линией (рис. 24).

По наклону графика скорости может быть определено ускорение  $a$  материальной точки. Соответствующие построения выполнены на рис. 25 для графика I. Ускорение численно равно отношению сторон треугольника  $ABC$  :

$$a = \frac{v - v_0}{t} = \frac{|BC|}{|AC|}. \quad (28)$$



**Рис. 24.** Графики скорости равноускоренного движения (I:  $v_0 = -2 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ,  $a = 0,5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$ ; II:  $v_0 = 3 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ,  $a = 0,333\dots \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$ )



Чем больше угол  $\beta$ , который образует график скорости с осью времени, т. е. чем больше наклон графика (*крутизна*), тем больше ускорение материальной точки.

График скорости позволяет также определить модуль перемещения  $S$  материальной точки за некоторое время  $t$ . Выделим на оси времени некоторый малый промежуток времени  $\Delta t$ . Если этот промежуток времени достаточно мал, то и изменение скорости за этот промежуток невелико, т. е. движение в течение этого промежутка времени можно считать равномерным с некоторой средней скоростью, которая равна мгновенной скорости  $v$  материальной точки в середине промежутка  $\Delta t$ . Следовательно, перемещение  $\Delta S$  за время  $\Delta t$  будет равно  $\Delta S = v\Delta t$ . Это перемещение равно площади заштрихованной полоски на рис. 25. Разбив промежуток времени от 0 до некоторого момента  $t$  на малые промежутки  $\Delta t$ , можно увидеть, что перемещение  $S$  за заданное время  $t$  при равноускоренном прямолинейном движении равно площади трапеции  $ODEF$ . Соответствующие построения выполнены на рис. 25 для графика II. Время  $t$  принято равным 5,5 с.

$$S = \frac{(|OD| + |EF|)}{2} \cdot |OF| = \frac{v_0 + v}{2} \cdot t = \frac{2v_0 + (v - v_0)}{2} \cdot t. \quad (29)$$

Так как  $v - v_0 = at$ , окончательная формула для проекции перемещения материальной точки на ось  $OX$   $S_X$  при равномерно ускоренном движении на промежутке времени от  $0$  до  $t$  запишется в виде:

$$S_X = v_{0X}t + \frac{a_X t^2}{2}. \quad (30)$$

Для нахождения координаты  $x$  материальной точки в любой момент времени  $t$  нужно к начальной координате  $x_0$  прибавить перемещение за время  $t$ :

$$x = x_0 + v_{0X}t + \frac{a_X t^2}{2}. \quad (31)$$

Выражение (31) называют **уравнением (законом) равноускоренного (равнопеременного) движения**.

При анализе равноускоренного движения можно определить проекцию на ось  $OX$  перемещения материальной точки по заданным значениям начальной  $v_0$  и конечной  $v$  скоростей и ускорения  $a$ . Эта задача может быть решена с помощью уравнений (27) и (30) путем исключения из них времени  $t$ :

$$S_X = \frac{v_X^2 - v_{0X}^2}{2a_X}, \quad S_X \geq 0. \quad (32)$$

Из формулы (32) можно получить выражение для определения скорости  $v$  материальной точки, если известны начальная скорость  $v_0$ , ускорение  $a$  и перемещение:

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2aS_X}. \quad (33)$$

Если начальная скорость  $v_0$  равна нулю:

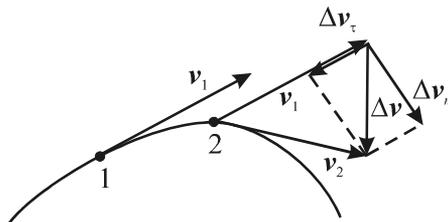
$$S = \frac{v^2}{2a}, \quad (34)$$

$$v = \sqrt{2aS}. \quad (35)$$

**Средняя скорость** — отношение перемещения материальной точки за некоторый промежуток времени к этому промежутку:

$$v_{cp} = \frac{\Delta S}{\Delta t}. \quad (36)$$

Мгновенная скорость  $v$  материальной точки в любой точке криволинейной траектории направлена по касательной к траектории в этой точке. Различие между средней и мгновенной скоростями иллюстрирует рис. 25.



**Рис. 25.** Средняя  $v_{cp}$  и мгновенная  $v$  скорости на участках перемещения  $\Delta S_1, \Delta S_2, \Delta S_3$  за время  $\Delta t_1 < \Delta t_2 < \Delta t_3$ . При  $t \rightarrow 0$   $v_{cp} \rightarrow v$

Иногда под средней скоростью понимают скалярную величину, равную отношению пути  $\Delta l$ , пройденного материальной точкой за некоторый промежуток времени  $\Delta t$ , к этому промежутку времени:

$$v_{cp} = \frac{\Delta l}{\Delta t}. \quad (37)$$

Из выражения (36):

$$S = \frac{v_0 + v}{2} t, \quad (38)$$

но:

$$v = v_0 + at, \quad (39)$$

Откуда получаем уравнение равноускоренного (равнопеременного) движения:

$$S = v_0 t + \frac{at^2}{2}, \quad (40)$$

$$x = x_0 + v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}, \quad (41)$$

где  $x_0$  — координата материальной точки в момент начала отсчета времени,  $x$  — координата тела через время  $t$  после начала отсчета,  $v_{0x}$  — проекция начальной скорости на ось  $OX$ ,  $a_x$  — проекция ускорения на ось  $OX$ .

**Таблица 4.** Примеры средних скоростей [1]

Пример	Скорость		
	м·с <sup>-1</sup>	км·ч <sup>-1</sup>	км·с <sup>-1</sup>
Человеческая кровь в капиллярах	0,0005—0,0020		
Человеческая кровь в вене	0,10—0,20		
Человеческая кровь в артерии	0,2—0,5		

Таблица 4 (окончание)

Пример	Скорость		
	м·с <sup>-1</sup>	км·ч <sup>-1</sup>	км·с <sup>-1</sup>
Скоростной лифт	3,5—6		
Бегун-спринтер	10	36	
Конькобежец-спринтер	13	47	
Очень сильный ветер (шторм)	20,8—24,4		
Нервный импульс	40—100		
Скорость звука в воздухе при 0 °С (М)	331	1192	0,331
Луна на орбите вокруг Земли (см. разд. 4.2)	1000	3600	1
Молекула водорода при 0 °С	1693	6095	
Вторая космическая скорость на Луне	2400	8640	2,4
Космический корабль по орбите вокруг Земли (см. разд. 5.5)	7910	28 476	7,91
Вторая космическая скорость на Земле (см. разд. 5.5)	11 190	40 284	11,19
Земля по орбите вокруг Солнца (см. разд. 5.5)	30 000	108 000	30
Солнце по отношению к центру Галактики	250 000	900 000	250
Скорость света в вакууме $c_0$	299 792 458		299 792,458

Таблица 5. Некоторые рекорды скорости

Год	Скорость, км·ч <sup>-1</sup>	Машина
1906	205,380	Stanley — автомобиль с паровым двигателем
1964	648,709	Blue Bird KN7 — автомобиль с газовой турбиной
1965	658,649	Goldenrod — автомобиль с тягой благодаря сцеплению колес с дорогой и с поршневым двигателем
1970	1001,670	Blue Flame — автомобиль с реактивной тягой
1971	245,192	Silver Eagle — электромобиль

### Контрольные вопросы

- ? Какое движение называют равноускоренным или равнопеременным?
- ? Дайте определение мгновенной скорости прямолинейного переменного движения; его средней скорости.
- ? Почему формулу для средней скорости в общем случае нельзя записывать в векторной форме? В каком случае ее можно записывать в векторной форме?
- ? Напишите закон движения для движения точки с постоянным ускорением.
- ? Напишите закон изменения скорости для движения точки с постоянным ускорением.
- ? Постройте и объясните график скорости прямолинейного равноускоренного движения с начальной и без начальной скорости.
- ? Как по графику скорости равноускоренного движения определить ускорение и путь, пройденный точкой в этом движении?

## 2.10. Криволинейное движение

**Криволинейное движение** — движение (точки) по криволинейной траектории (см. рис. 18).

**Вектор средней скорости при криволинейном движении** — величина, равная отношению вектора перемещения  $\Delta \mathbf{r}$  к интервалу времени  $\Delta t$ , за которое это перемещение произошло:

$$\mathbf{v}_{cp} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t}. \quad (42)$$

Вектор средней скорости совпадает по направлению с вектором перемещения.

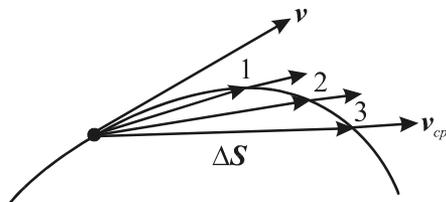
**Мгновенную скорость при криволинейном движении** можно определить аналогично скорости прямолинейного движения:

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \right). \quad (43)$$

Мгновенная скорость направлена по касательной к траектории в данной точке (см. рис. 18).

При неравномерном движении материальной точки по криволинейной траектории ее скорость  $\mathbf{v}$  изменяется по модулю и направлению. Изменение вектора скорости  $\mathbf{v}$  за некоторый малый промежуток времени  $\Delta t$  можно задать с помощью вектора  $\Delta \mathbf{v}$  (рис. 26). Вектор изменения скорости  $\Delta \mathbf{v} = \mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1$  за малое время  $\Delta t$  можно разложить на две составляющие:  $\Delta \mathbf{v}_\tau$ , направленную

вдоль вектора  $\mathbf{v}$  (**касательная** или **тангенциальная составляющая**), и  $\Delta v_n$ , направленную перпендикулярно вектору  $\mathbf{v}$  (**нормальная составляющая**) (рис. 26).



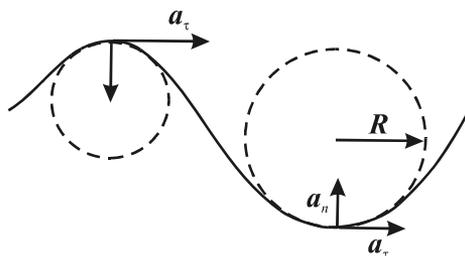
**Рис. 26.** Изменение вектора скорости по величине и направлению при криволинейном движении:  $\Delta \mathbf{v} = \Delta v_\tau + \Delta v_n$  — изменение вектора скорости за время  $\Delta t$

### Контрольные вопросы

- ? Дайте определение криволинейного движения.
- ? Как направлена мгновенная скорость при криволинейном движении?

## 2.11. Нормальное и тангенциальное ускорения

Криволинейное движение можно рассматривать как сложное движение, отдельные участки которого можно представить как движение по окружности, и поступательное движение (рис. 27).



**Рис. 27.** Движение по дугам окружностей

Движение по окружности — есть движение с ускорением, т. к. при этом изменяется вектор скорости. Ускорение при криволинейном движении можно разложить на две составляющие — тангенциальную (касательную) и нормальную (рис. 28).

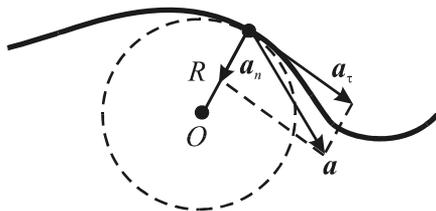


Рис. 28. Ускорение при криволинейном движении

**Тангенциальное (касательное) ускорение**  $a_\tau$  характеризует быстроту изменения скорости по значению и направлено по касательной к траектории в заданной точке. Модуль тангенциальной составляющей равен:

$$a_\tau = \frac{dv}{dt}. \quad (44)$$

**Нормальное (центростремительное) ускорение** направлено перпендикулярно касательной (по нормали) к центру кривизны и характеризует быстроту изменения скорости по этому направлению.

Полное ускорение при криволинейном движении равно:

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}_\tau + \mathbf{a}_n, \quad (45)$$

а его модуль:

$$a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}. \quad (46)$$

Пусть тангенциальное ускорение равно нулю, а нормальное — постоянно, тогда мгновенную скорость  $v$  называют **линейной** ( $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$ ). По значению она не изменяется, следовательно,  $R = \text{const}$ . Траекторией такого движения будет окружность.

### Контрольные вопросы

- ? Напишите формулу модуля нормального ускорения.
- ? Что называют линейной скоростью тела при его движении по окружности?

## 2.12. Угловая скорость, угловое ускорение

Определим скорость при равномерном движении материальной точки по окружности. Длина окружности  $2\pi R$ . Если материальная точка сделает  $N$  оборотов, то длина пройденного пути будет  $2\pi RN$ . Если  $N$  оборотов выполнены за время  $t$ , то тангенциальная (линейная) скорость будет равна:

$$v = 2\pi R \frac{N}{t}. \quad (47)$$



Измерение линейной скорости при равномерном движении по окружности сводится к измерению времени, за которое будет сделано определенное число оборотов.

**Частота вращения (обращения)  $\nu$**  при равномерном вращении — число оборотов в единицу времени:

$$\nu = \frac{N}{t}. \quad (48)$$

Тогда:

$$v = 2\pi R\nu, \quad (49)$$

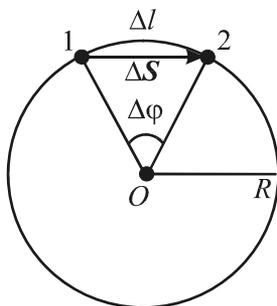
$$a = 4\pi^2 R\nu^2. \quad (50)$$

Минимальный промежуток времени, за который система возвращается в то же состояние при равномерном вращении (т. е. материальная точка возвращается в свое начальное положение), называют **периодом**:

$$T = \frac{t}{N} = \frac{1}{\nu}. \quad (51)$$

Единица периода  $T$  в СИ — секунда (с). Единица частоты  $\nu = \frac{1}{T}$  в СИ — герц<sup>1</sup> (Гц, Hz). Часто используются кратные единицы: кГц, МГц, ГГц и т. п.

Наряду с вектором *перемещения*  $\Delta\mathbf{S}$  удобно рассматривать **угловое перемещение**  $\Delta\varphi$  (или **угол поворота**), измеряемое в радианах (рис. 29).



**Рис. 29.** Линейное  $\Delta\mathbf{S}$  и угловое  $\Delta\varphi$  перемещения при движении материальной точки по окружности

<sup>1</sup> Названа в честь немецкого физика Генриха Рудольфа Герца (Heinrich Hertz, 1857—94).

Длина дуги связана с углом поворота соотношением:

$$\Delta l = R \sin \Delta\varphi \cong R\Delta\varphi = \Delta S, \quad (52)$$

где  $R$  — радиус окружности.

**Угловая скорость**  $\omega$  — векторная величина, характеризующая быстроту изменения угла поворота радиус-вектора, равная отношению угла  $\Delta\varphi$  поворота материальной точки к промежутку времени  $\Delta t$ , за который совершен поворот:

$$|\omega| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}. \quad (53)$$

Угловая скорость  $\omega$  направлена вдоль неподвижной оси, вокруг которой вращается материальная точка, в сторону, определяемую правилом правого винта или правилом правой руки, и представляет собой **псевдовектор** (осевой вектор или аксиальный вектор) — вектор в ориентированном пространстве, который при изменении ориентации пространства преобразуется в противоположный вектор.

Учитывая, что за время  $T$ , равное периоду, радиус-вектор повернется на угол  $2\pi$ , можно записать:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}. \quad (54)$$

Единицей угловой скорости в основных системах единиц является радиан в секунду ( $1 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$ ).

Из (51) следует:

$$\omega = 2\pi\nu. \quad (55)$$

Из (49) и (55) легко найти связь между линейной и угловой скоростью:

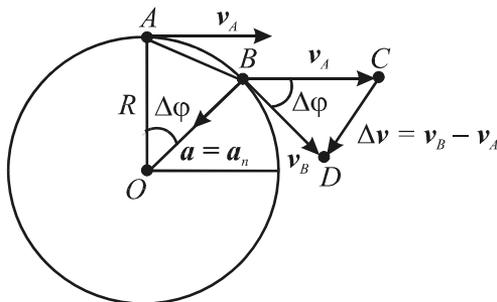
$$v = \omega R. \quad (56)$$

Изменение вектора угловой скорости со временем характеризуется величиной  $\beta$ :

$$\beta = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt}, \quad (57)$$

которую называют **угловым ускорением**. Угловое ускорение, как и угловая скорость, является псевдовектором, т. е. его вектор направлен вдоль оси вращения.

Рассмотрим изменение вектора скорости  $\Delta v = v_A - v_B$  за малый промежуток времени  $\Delta t$  (рис. 30).



**Рис. 30.** Нормальное ускорение  $\mathbf{a}_n$  материальной точки при равномерном движении по окружности

По определению ускорения:

$$\mathbf{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}_\tau}{\Delta t}. \quad (58)$$

При малых значениях угла  $\Delta\varphi = \omega\Delta t$  расстояние  $|AB| = \Delta S \approx v_\tau \Delta t$ . Так как  $|OA| = R$  и  $|CD| = \Delta v_\tau$ , из подобия треугольников на рис. 30 получаем:

$$\frac{R}{v_\tau \Delta t} \approx \frac{v_\tau}{\Delta v_\tau} \quad \text{или} \quad \frac{\Delta v_\tau}{\Delta t} \approx \frac{v_\tau^2}{R}. \quad (59)$$

При малых углах  $\Delta\varphi$  направление вектора  $\Delta \mathbf{v} = \mathbf{v}_B - \mathbf{v}_A$  приближается к направлению на центр окружности. Следовательно, переходя к пределу при  $\Delta t \rightarrow 0$ , получим:

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}_n = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}_\tau}{\Delta t} = \frac{v_\tau^2}{R} \mathbf{n}. \quad (60)$$

где  $R$  — радиус кривизны,  $\mathbf{n}$  — единичный вектор ( $|\mathbf{n}| = 1$ ,  $\mathbf{n} \parallel \mathbf{R}$ ).



Модуль нормального ускорения зависит от скорости материальной точки и радиуса кривизны траектории в соответствующей точке.

Модуль нормального ускорения связан с угловой скоростью  $\omega$ :

$$a_n = \omega^2 R. \quad (61)$$

При равномерном движении материальной точки по окружности модуль ускорения остается неизменным, но направление вектора ускорения изменяется

со временем. Вектор ускорения в любой точке окружности направлен к ее центру. Поэтому ускорение при равномерном движении материальной точки по окружности является нормальным. В векторной форме нормальное ускорение записывают в виде:

$$\mathbf{a}_n = -\omega^2 \mathbf{R}, \quad (62)$$

где  $\mathbf{R}$  — радиус-вектор точки на окружности, причем начало этого радиус-вектора находится в центре окружности.

Если материальная точка движется по окружности неравномерно, то появляется также тангенциальная составляющая ускорения:

$$a_\tau = \frac{\Delta v_\tau}{\Delta t}, \quad (63)$$

где  $\Delta v_\tau = v_2 - v_1$  — изменение модуля скорости за промежуток времени  $\Delta t$ .

Мгновенным ускорением при вращательном движении называют:

$$a_\tau = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v_\tau}{\Delta t} = \frac{dv_\tau}{dt}.$$

Направление вектора полного ускорения  $\mathbf{a} = \mathbf{a}_n + \mathbf{a}_\tau$  определяется в каждой точке круговой траектории величинами нормального и касательного ускорений (рис. 31).

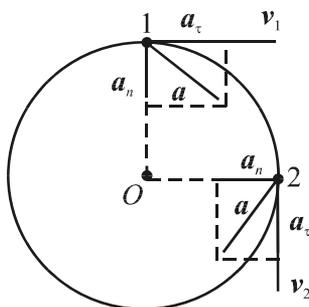


Рис. 31. Составляющие ускорения  $\mathbf{a}_n$  и  $\mathbf{a}_\tau$  при неравномерном движении тела по окружности

Движение материальной точки по окружности можно описывать с помощью двух координат  $x$  и  $y$  (**плоское движение**). Скорость материальной точки в каждый момент можно разложить на две составляющие:  $v_x$  и  $v_y$  (рис. 32).

При равномерном вращении материальной точки величины  $x$ ,  $y$ ,  $v_x$ ,  $v_y$  будут периодически изменяться во времени по гармоническому закону с периодом:

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi}{\omega}. \quad (64)$$

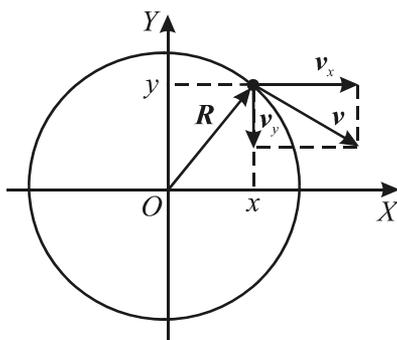


Рис. 32. Разложение вектора скорости  $v$  по координатным осям  $x$  и  $y$



Основными физическими величинами в кинематике материальной точки являются пройденный путь  $l$ , перемещение  $S$ , скорость  $v$  и ускорение  $a$ . Путь  $l$  является скалярной величиной. Перемещение  $S$ , скорость  $v$  и ускорение  $a$  — величины векторные.

### Контрольные вопросы

- ? Что такое угловая скорость и в каких единицах она измеряется?
- ? Что такое линейная скорость и как она выражается через угловую скорость?
- ? Выведите формулу, выражающую зависимость между линейной и угловой скоростью.
- ? Что называют периодом и частотой обращения? Как эти величины связаны между собой?
- ? Напишите формулу, выражающую связь центростремительного ускорения с угловой и линейной скоростями, а также с периодом и частотой обращения.

# ГЛАВА 3

## Динамика материальной точки

Кромешной тьмой был мир окутан,  
И в тайны естества наш взор не проникал,  
Но Бог сказал: "Да будет Ньютон!"  
И свет над миром воссиял.

*А. Поуп<sup>1</sup>*

### 3.1. Инерциальные системы отсчета

**Динамика** — раздел механики, изучающий движение тел совместно с причинами, вызывающими это движение.

**Взаимодействием** тел принято называть взаимное влияние тел на движение каждого из них.

**Инерциальная система отсчета (ИСО)** — система, в которой все тела находятся в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения, если сумма всех взаимодействий на любое из тел системы равна нулю. В этом случае всякое механическое движение описывается наиболее простым способом.

Понятие "инерциальная система отсчета" является научной абстракцией. Реальная система отсчета всегда связывается с каким-нибудь конкретным телом (Землей, корпусом корабля или самолета и т. п.), по отношению к которому и изучается движение различных объектов. Поскольку все реальные тела движутся с тем или иным ускорением, любая реальная система отсчета может рассматриваться как ИСО отсчета лишь с определенной степенью приближения.

Опытным путем установлено, что система отсчета, центр которой совмещен с Солнцем, а оси направлены на соответствующим образом выбранные звезды, является с очень высокой степенью точности инерциальной. Ее называют **гелиоцентрической системой отсчета (или системой Коперника<sup>2</sup>)**.

---

<sup>1</sup> Проект эпитафии на могиле Ньютона, стихотворный перевод Ю. Данилова.

<sup>2</sup> Николай Коперник (Nicolaus Copernicus, 1473—1543 гг.) — польский астроном, создатель гелиоцентрической системы мира.

В повседневной практике за *тело отсчета* чаще всего принимают Землю, считая **геоцентрическую систему**, связанную с Землей, инерциальной. Однако хорошо известно, что Земля вращается вокруг своей оси, т. е. движется с ускорением и, строго говоря, система отсчета, связанная с Землей, не является инерциальной. Система отсчета, связанная с Землей, очень удобна во многих практических случаях. Ею, в частности, пользуются при астрономических наблюдениях, изучая положение и движение звезд, Солнца, Луны и других небесных тел.



Для решения большинства технических задач ИСО можно считать системой, жестко связанную с Землей.

Из классического закона сложения скоростей (22) следует, что при равномерном и прямолинейном движении систем отсчета друг относительно друга ускорения тела в этих двух системах одинаковы, т. е.  $\mathbf{a} = \mathbf{a}'$ . Действительно, если  $\mathbf{v}_0$  — вектор, модуль которого и направление остаются неизменными во времени, то любое изменение  $\Delta \mathbf{v}'$  относительной скорости тела будет совпадать с изменением  $\Delta \mathbf{v}$  его абсолютной скорости. Следовательно:

$$\frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{\Delta \mathbf{v}'}{\Delta t}. \quad (65)$$

Переходя к пределу ( $\Delta t \rightarrow 0$ ), получим:  $\mathbf{a} = \mathbf{a}'$ .

Пусть относительно тела  $A$ , с которым связана ИСО, тело  $B$  покоится или движется равномерно и прямолинейно. Тогда система отсчета, связанная с телом  $B$ , также является инерциальной.



Инерциальных систем существует бесконечное множество. Все ИСО образуют класс систем, которые движутся друг относительно друга равномерно и прямолинейно. Ускорения какого-либо тела в разных инерциальных системах одинаковы.

Систему отсчета, движущуюся по отношению к ИСО с ускорением, называют *неинерциальной* (см. разд. 7.1).

### Контрольные вопросы

- ? Охарактеризуйте инерциальную систему отсчета.
- ? Какие инерциальные системы отсчета Вы знаете?

? Можно ли считать инерциальными системы отсчета, неподвижно связанные с Землей?

## 3.2. Принцип инерции, принципы относительности

Галилей исследовал законы движения самых обычных предметов, которые были у него под рукой. К тому времени прошло почти 2000 лет с тех пор, как Аристотель сформулировал свой закон о пропорциональности скорости движения тела воздействию на него (1). Производя различные опыты, чтобы выяснить, как скатываются шарики по наклонной плоскости, как качаются маятники и т. д., Галилей открыл движение по инерции: *"Когда тело движется по горизонтальной плоскости, не встречая никакого сопротивления движению, то... движение его является равномерным и продолжалось бы бесконечно, если бы плоскость простиралась в пространстве без конца"*. В самом деле, *"при движении по наклонной плоскости вниз наблюдается ускорение, а при движении вверх — замедление. Отсюда следует, что движение по горизонтали является неизменным, ибо ... оно ничем не ослабляется, не замедляется и не ускоряется"*.

**Принцип (закон) инерции** Галилея (1632 г.).

Если на предмет ничто не действует, и он движется с определенной скоростью по прямой линии, то он будет двигаться с той же самой скоростью и по той же самой прямой линии вечно.

Таким образом, тело может двигаться и в отсутствие какого-либо внешнего воздействия. Подобное движение называют **свободным движением** или **движением по инерции**. Согласно Галилею, внешним воздействием определяется не скорость тела (как считал Аристотель), а ее изменение. *"Степень скорости, обнаруживаемая телом, ненарушимо лежит в самой его природе, в то время как причины ускорения или замедления являются внешними"*, — подчеркивал Галилей.

Явление сохранения телом скорости движения при отсутствии внешних воздействий на него со стороны других тел или равенстве нулю равнодействующей таких воздействий называют **инерцией**.

Свойство материальных тел, проявляющееся в том, что тело сохраняет неизменным состояние своего движения или покоя по отношению к инерциальной системе отсчета, когда внешние воздействия на тело (силы) отсутствуют или взаимно уравновешиваются, называют **инертностью**. Одним из основных законов динамики материальных тел является **закон инерции**, согласно которому тело при взаимном уравновешивании всех внешних воздействий

(или при отсутствии внешних воздействий) сохраняет неизменным состояние покоя или равномерного прямолинейного движения относительно ИСО, пока приложенные воздействия не заставляют его изменить это состояние.

В 1636 г. Галилей сформулировал **принцип относительности**.

Во всех ИСО законы механики описываются одними и теми же уравнениями.

Фактически отсюда вытекает требование независимости законов классической (нерелятивистской) механики от выбора ИСО, понимаемое как инвариантность уравнений механики относительно **преобразований Галилея**, т. е. преобразований координат  $\mathbf{r}$  и времени  $t$  движущейся материальной точки при переходе от одной ИСО к другой:

$$\mathbf{r} \rightarrow \mathbf{r}' = \mathbf{r} + \mathbf{v}t ; \quad (66)$$

$$t \rightarrow t' = t , \quad (67)$$

где  $\mathbf{v}$  — относительная (постоянная) скорость двух ИСО, движущихся поступательно и прямолинейно; штрихованные и нештрихованные величины относятся к разным ИСО. Под ИСО при этом понимается *система отсчета*, в которой выполняется *первый закон Ньютона*.

Впервые положение об относительности механического движения было опубликовано Галилеем в его труде "Диалог о двух основных системах мира — птолемеевой и коперниковой". Там же сформулирован и принцип относительности. Галилей использовал наглядный и образный метод изложения. Он писал: *"Уединитесь с кем-нибудь из друзей в просторное помещение под палубой какого-нибудь корабля... Пока корабль стоит неподвижно, наблюдайте прилежно, как мелкие летающие животные с одной и той же скоростью движутся во все стороны помещения; ...все падающие капли попадут в подставленный сосуд и вам, бросая какой-нибудь предмет, не придется бросать его с большей силой в одну сторону, чем в другую, если расстояния будут одни и те же... Заставьте теперь корабль двигаться с любой скоростью, и тогда (если только движение корабля будет равномерным и без качки в ту или другую сторону) во всех названных явлениях вы не обнаружите ни малейшего изменения и ни по одному из них вы не сможете установить, движется корабль или стоит на месте неподвижно"*. При этом подчеркивались два положения, составляющие суть принципа относительности:

- движение относительно: по отношению к наблюдателю *"в помещении под палубой"* и к тому, кто смотрит с берега, движение выглядит по-разному;
- никакие опыты в *"закрытой кабине"* не позволяют определить, покоится кабина или движется равномерно и прямолинейно.

Принцип относительности Галилея содержит в себе представление об абсолютном времени и абсолютном пространстве: время не изменяется при пере-

ходе от одной ИСО к другой и подразумевается априорная возможность выбора глобальной ИСО независимо от существования и движения материальных тел. Из принципа относительности Галилея вытекает классический закон сложения скоростей как векторов в трехмерном евклидовом пространстве.



Все инерциальные системы равнозначны: никакими механическими опытами, проводящимися в какой-либо ИСО, нельзя определить, покоится данная система или движется равномерно и прямолинейно.

При переходе из одной ИСО в другую ИСО, движущуюся по отношению к первой прямолинейно и равномерно, координаты преобразуются, а время остается неизменным. Таким образом, принимается, что время абсолютно.

---

В 1905 г. Эйнштейн распространил принцип относительности на другие виды движения материи (в частности на явления *гравитации*) (см. разд. 10.1) — **принцип относительности Эйнштейна**.

Никакие опыты (механические, электрические, оптические), проведенные в данной инерциальной системе отсчета, не дают возможности обнаружить, покоится ли эта система или движется равномерно и прямолинейно; все законы природы инвариантны по отношению к переходу от одной инерциальной системы к другой (т. е. во всех инерциальных системах отсчета физические явления протекают одинаково).

#### Контрольные вопросы

- ? В чем состоит явление инерции?
- ? В чем состоит свойство тел, называемое инертностью?
- ? В чем различие принципов относительности Галилея и Эйнштейна?

### 3.3. Первый закон Ньютона

Пусть никто не думает, что великое значение Ньютона может быть опровергнуто теорией относительности или какой-нибудь другой теорией. Ясные и широкие идеи Ньютона навечно сохраняют свое значение фундамента, на котором построены наши современные физические представления.

*А. Эйнштейн*

Еще в 1674 г. английский естествоиспытатель Роберт Гук (Robert Hooke, 1635—1703 гг.) в "Попытке изучения движения Земли" писал: "*...все тела, движущиеся прямолинейным и равномерным образом, будут двигаться по*

прямой линии до тех пор, пока они не будут отклонены какой-нибудь силой и не станут описывать траектории по кругу, эллипсу или какой-нибудь другой менее простой кривой".

В 1684 г. Ньютон пообещал английскому астроному и геофизику Эдмунду Галлэю (Edmund Halley, 1656—1742 гг.) изложить свои взгляды на движение тел, которые, как он потом скажет, "вполне достаточны для объяснения всех движений небесных тел и моря". До него никому не удалось объяснить законы движения планет на основе четких математических принципов. В 1686 г. Ньютон полностью завершил работу над рукописью, и в следующем году "Математические начала натуральной философии" были изданы.

В предисловии Ньютон писал: "...сочинение это нами предлагается как математические основания физики. Вся трудность физики... состоит в том, чтобы по явлениям движения распознать силы природы, а затем по этим силам объяснить остальные явления... Было бы желательно вывести из начал механики и остальные явления природы, рассуждая подобным же образом, ибо многое заставляет меня предполагать, что все эти явления обусловливаются некоторыми силами, с которыми частицы тел вследствие причин, пока неизвестных, или стремятся друг к другу и сцепляются в правильные фигуры, или же взаимно отталкиваются и удаляются друг от друга. Так как эти силы неизвестны, до сих пор попытки философов объяснить явления природы и оставались бесплодными. Я надеюсь, однако, что или этому способу рассуждения, или другому, более правильному, изложенные здесь основания доставят некоторое освещение".

Чтобы навсегда покончить с существовавшей ранее терминологической путаницей, Ньютон начал свою книгу с определений основных понятий механики: массы, количества движения, силы и т. д. Затем он сформулировал "аксиомы или законы движения"; на их основе доказывались многочисленные следствия и теоремы. В этой книге впервые дан закон всемирного тяготения и подробно рассмотрена теория движения небесных тел.

Под массой Ньютон понимал "тело" или "количество материи". Последнее, согласно Ньютону, "есть мера таковой, происходящая от ее плотности и объема".

После массы Ньютон определил количество движения  $K$  — понятие, введенное еще Декартом и именующееся в настоящее время импульсом  $p$  (см. разд. 3.8). Согласно Ньютону количество движения — это произведение массы тела на его скорость.

Открытый Галилеем закон инерции был сформулирован Ньютоном в 1687 г. как первый из законов механики Ньютона:

$$K = p = mv = \text{const}, \quad (68)$$

где  $K$  — количество движения;  $p$  — импульс;  $m$  — коэффициент пропорциональности;  $v$  — скорость.

Из **первого закона Ньютона** следовало: Всякое тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, если взаимно компенсируются действия на него со стороны других тел (т. е. если равнодействующая всех приложенных к нему сил равна нулю).



---

Скорость любого тела в ИСО остается постоянной ( $v = \text{const}$ ), пока воздействие на это тело со стороны других тел не вызовет ее изменения.

---

Следовательно, **инерциальная система отсчета** — система отсчета, в которой выполняется первый закон Ньютона: материальная точка (тело, *центр масс*), когда на нее не действуют никакие силы (или действуют силы взаимно уравновешенные), находится в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения.



---

Первый закон Ньютона постулирует существование инерциальных систем отсчета.

---

Формулируя свой первый закон, Ньютон ссылаясь на труды Галилея, хотя, судя по начальным наброскам, наибольшее влияние на него оказывали работы Декарта. Ведь именно он впервые дал правильную трактовку явления инерции и сформулировал данный закон.

#### Контрольные вопросы

- ? В чем состоит первый закон Ньютона?
- ? Как формулируется первый закон Ньютона?
- ? Можно ли его проверить опытным путем?

### 3.4. Сила

Вводя те или иные физические величины, мы должны четко и однозначно определять, что мы под этим понимаем. Вот почему мы до этого момента по возможности избегали использования понятия "сила", заменяя его "взаимодействием" и т. п. В обыденной жизни можно услышать такие фразы: "Он толкнул меня с силой", "Сила дождя была столь велика, что реки вышли из берегов", "Мотор насоса обладает силой, достаточной для того, чтобы отка-

чать всю воду за один час". Во всех трех случаях использовано слово "сила". Однако в физике слово "сила" можно оставить только для первой фразы (да и то не строго, поскольку значение силы не определено), а во второй фразе следовало бы использовать термин "интенсивность", в третьей — "мощность". Итак, настало время четко определить, что мы будем понимать под термином "сила".

Ньютон предположил: для того чтобы изменить количество движения тела, требуется действие других тел на это тело, причем сила их действия пропорциональна изменению количества движения. Планете, вращающейся вокруг Солнца, не нужна сила, чтобы двигаться вперед; если бы никакой силы не было, планета летела бы по касательной. Но на самом деле планета летит не по прямой. Она все время оказывается не в том месте, куда попала бы, если бы летела свободно (рис. 33). Другими словами, ее скорость, ее движение отклоняются в сторону Солнца.

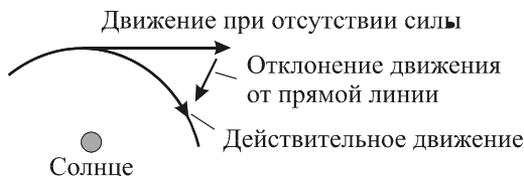


Рис. 33. Влияние силы на движение планеты

Силу Ньютон, в отличие от многих своих предшественников, рассматривал как нечто внешнее по отношению к телу, на которое она действует, а не как присущее ему внутреннее свойство. Результатом действия силы, по Ньютону, является изменение состояния покоя или равномерного прямолинейного движения. В "Математических началах натуральной философии" Ньютон писал: "...Сила проявляется единственно в действии и по прошествии действия в теле не остается. Тело продолжает удерживать свое новое состояние вследствие только (силы) инерции".

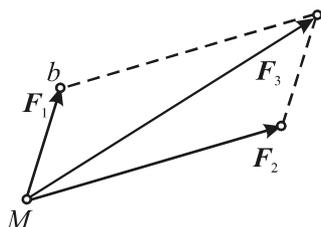
**Сила** в механике — векторная величина, являющаяся основной мерой механического действия других тел на данное материальное тело<sup>1</sup>.

**Сложение сил** — нахождение геометрической суммы (**главного вектора**) данной системы сил путем последовательного применения *правила параллелограмма* сил или построения силового многоугольника.

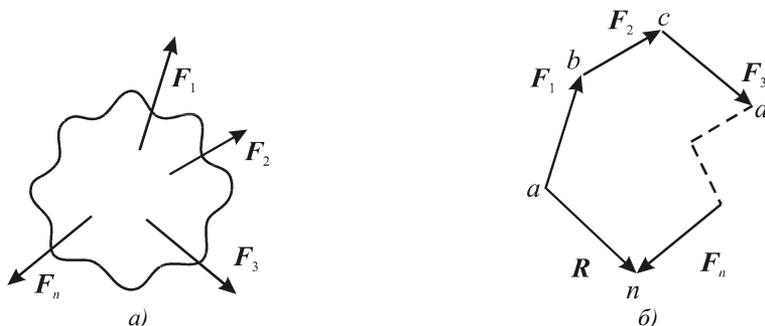
<sup>1</sup> Иногда в простых случаях (когда это не приводит к ошибкам) для краткости и наглядности "путают" силу с ее проекцией, вектор со скалярной величиной и т. д. Разумеется, при этом нужно помнить, где формальная строгость принесена в жертву простоте.



**Сила** — это количественная мера взаимодействия тел. Сила является причиной изменения скорости тела. Сила является векторной величиной. Векторную сумму всех сил, действующих на тело, называют **равнодействующей силой**.



**Рис. 34.** равнодействующая  $F_3$  сил  $F_1$  и  $F_2$  по правилу параллелограмма



**Рис. 35.** Сложение сил: (а) — силы  $F_1, F_2, F_3, \dots, F_n$ , приложенные к телу; (б) — сложение сил по правилу многоугольника,  $abcd\dots n$  — силовой многоугольник;  $R$  — равнодействующая сила

В повседневной жизни под "силой" понимается некое мускульное действие, которое приходится затрачивать для того, чтобы привести какое-нибудь тело в движение или, наоборот, затормозить это движение. Во всех случаях изменяется и скорость движения, т. е. появляется ускорение.

В физике силой называют любую причину изменения скорости тела. При этом скорость тела как вектор может изменять и направление, и модуль.

Для измерения сил необходимо установить эталон силы и способ сравнения других тел с этим эталоном. В качестве эталона силы можно взять пружину, растянутую до некоторой заданной длины. Модуль силы  $F_0$ , с которой эта пружина при фиксированном растяжении действует на прикрепленное к ее концу тело, называют **эталонной силой**. Если тело под действием измеряемой

силы и эталонной силы остается в покое (или движется прямолинейно и равномерно), то силы равны по модулю:  $F = F_0$  (рис. 36).

На практике нет необходимости все измеряемые силы сравнивать с эталоном силы. Для измерения сил используют откалиброванные пружины, называемые **динамометрами** (рис. 37).

Сила измеряется по растяжению динамометра (рис. 38).

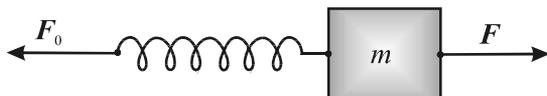


Рис. 36. Сравнение силы  $F$  с эталоном ( $F = F_0$ )



Рис. 37. Пружинные динамометры

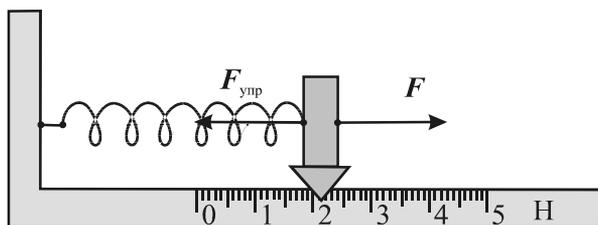


Рис. 38. Измерение силы по растяжению пружины. При равновесии  $F = -F_{упр}$

### Контрольные вопросы

- ? Что такое сила и чем она характеризуется?
- ? Какие способы измерения силы Вы можете предложить?

? Если на тело действуют несколько сил, как определяется равнодействующая этих сил?

? Сформулируйте первый закон Ньютона, используя понятие силы.

### 3.5. Основные силы в физике

После открытия большого числа элементарных частиц в современной физике различают четыре вида фундаментальных взаимодействий.

- **Гравитационное** — обусловленное *всемирным тяготением*.
- **Электромагнитное** — осуществляемое через электрические и магнитные поля.
- **Сильное или ядерное** — обеспечивающее связь частиц в атомном ядре.
- **Слабое** — ответственное за многие процессы распада элементарных частиц. Неудачное название "слабые силы" произошло оттого, что эти силы в триллионы раз слабее ядерных. Соответственно этому "слабые процессы", являющиеся следствием слабых сил, происходят аномально медленно.

Относительные интенсивности указанных взаимодействий  $10^{-39} : 1 : 10^{-2} : 10^{-12}$ .

**Великое объединение взаимодействий** — теоретические попытки описания на единой основе слабого, электромагнитного и сильного взаимодействий.

В 1967 г. американский физик Стивен Вáйнберг (S. Weinberg, 1933 г.) и пакистанский физик Абдус Салáм (A. Salam, 1926 г.) разработали **теорию электрослабого взаимодействия**, объединяющего электромагнитное и слабое взаимодействия. В 1973 г. были открыты нейтральные токи, что впервые подтвердило справедливость теории электрослабого взаимодействия.

В рамках классической механики имеют дело с гравитационными и электромагнитными силами, а также с упругими силами и силами трения.

Гравитационные и электромагнитные силы являются **фундаментальными** — их нельзя свести к другим, более простым, силам.

*Упругие силы и силы трения* определяются характером взаимодействия между молекулами вещества. Силы взаимодействия между молекулами имеют электромагнитное происхождение. Следовательно, упругие силы и силы трения являются по своей природе электромагнитными. Упругие силы и силы трения не являются фундаментальными.

Законы фундаментальных сил просты, и формулы, их выражающие, являются точными. Для упругих сил и сил трения можно получить лишь приближенные эмпирические формулы.

### Контрольные вопросы

- ? Какие виды взаимодействий существуют в природе?
- ? Какие механические силы Вы знаете?

## 3.6. Второй закон Ньютона

Действие *силы* вызывает изменение *скорости* тела или его *деформацию* и может иметь место как при непосредственном контакте (движение прижатых друг к другу тел, трение), так и через посредство создаваемых телами физических полей.

**Физическое поле** — особая форма материи. К физическим полям относятся электромагнитное и *гравитационное* поля, поле ядерных сил, а также волновые (квантованные) поля, соответствующие различным частицам. Источниками физических полей являются частицы (например, для электромагнитного поля — заряженные частицы). Создаваемые частицами физические поля переносят (с конечной скоростью) взаимодействие между соответствующими частицами.

**Второй закон Ньютона (основной закон динамики материальной точки)** — возникшее под действием силы ускорение  $a$  пропорционально вызвавшей его силе  $F$ :

$$a = \frac{1}{m} F, \quad F = ma, \quad (69)$$

где  $F$  — сила;  $a$  — ускорение материальной точки;  $m$  — коэффициент пропорциональности, называемый **инертной массой** материальной точки. Это **уравнение движения**.

Другая формулировка второго закона Ньютона: произведение массы тела на его ускорение равно действующей на тело силе.

Это экспериментальный закон, т. е. он возник в результате обобщения данных опытов и наблюдений.

Американский физик-теоретик Ричард Филлипс Фейнман (Richard P. Feynman, 1918—1988 гг.) писал [52]:

*"...обнаружив основной закон, утверждающий, что сила есть масса на ускорение, а потом, определив силу как произведение массы на ускорение, мы ничего нового не открываем... такие высказывания не могут составить содержание физики: зачем же ей гонять определения по кругу... из одного определения никогда ничего никто не выводил... Истинное же содержание законов Ньютона таково: предполагается, что сила обладает **независимы-***

*ми свойствами* в дополнение к закону  $F = ma$ ; но *характерные независимые свойства сил не описал полностью ни Ньютон, ни кто-нибудь еще...*".

Если на тело одновременно действуют несколько сил, например сила тяжести  $F_T$  (см. разд. 5.2) и сила нормального давления  $F_N$ , то под силой  $F$  в формуле (69), выражающей второй закон Ньютона, нужно понимать *равнодействующую* всех сил:

$$F = F_T + F_N. \quad (70)$$

В частном случае, когда  $F = 0$  (т. е. при отсутствии воздействия на тело со стороны других тел), ускорение также равно нулю. Этот вывод совпадает с утверждением *первого закона Ньютона* (см. разд. 3.3). Поэтому первый закон входит во второй как его частный случай. Несмотря на это, первый закон формулируется независимо от второго, т. к. в нем, по сути, заключен постулат о существовании инерциальных систем отсчета.

*Эталон* единицы силы представляет собой созданную в Институте метрологии им. Д. И. Менделеева уникальную установку высотой 13 м. Основа эталона — круглые гири, соединенные в 9 пакетов. Пакеты имеют *массы*: 1, 2, 2, 5, 10, 20, 20, 20, 20 т. Каждый пакет может перемещаться вверх и вниз независимо от всех других. Пакеты навешиваются на штангу, проходящую через все гири. Изменяя комбинации пакетов в *гравитационном поле*, можно изменять усилия от 0,01 до 1 МН.

### Контрольные вопросы

- ? Сформулируйте второй закон Ньютона и приведите его опытные обоснования.
- ? Как движется тело, к которому приложена сила, постоянная по модулю и по направлению?
- ? Как направлено ускорение тела, вызванное действующей на него силой?

## 3.7. Масса

**Масса** — физическая величина, одна из основных характеристик материи, определяющая ее инерционные и гравитационные свойства.

В ньютоновской механике масса тела — *инертная масса*. Масса тела считается постоянной величиной, не зависящей от скорости тела. При скоростях, малых по сравнению со скоростью света, это предположение практически выполняется.

Величину массы определяют по различным ее проявлениям путем сравнения с массой какого-нибудь эталонного тела, произвольно принятого за единицу.

В системе СИ масса измеряется в килограммах (кг, kg), ускорение — в  $\text{м}\cdot\text{с}^{-2}$ , а сила — в ньютонах (Н, N). 1 **ньютон** — это такая сила, которая телу массой 1 кг сообщает ускорение  $1 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$ .

*Эталон* единицы массы **килограмм** — платиноиридиевый (90% Pt, 10% Ir) прототип (в виде цилиндрической гири диаметром и высотой 39 мм), принятый на III Генеральной конференции по мерам и весам в 1901 г. и хранящийся в Международном бюро мер и весов в Севре (табл. 6).

**Таблица 6.** Примеры значений массы [1]

Пример	Масса, кг
Электрон	$9,1 \cdot 10^{-31}$
Атом водорода	$1,7 \cdot 10^{-27}$
Молекула воды	$3 \cdot 10^{-26}$
Атом урана	$4 \cdot 10^{-25}$
Красное кровяное тельце	$1 \cdot 10^{-13}$
Клетка бактерии	$5 \cdot 10^{-12}$
Крыло мухи	$5 \cdot 10^{-8}$
Колибри ("шмель")	0,0017
Первый искусственный спутник Земли	83,6
Останкинская телебашня	$5,5 \cdot 10^7$
Атмосфера Земли	$5,1 \cdot 10^{18}$
Гидросфера Земли	$1,4 \cdot 10^{21}$
Луна	$7,36 \cdot 10^{22}$
Марс	$6,5 \cdot 10^{23}$
Земля	$5,98 \cdot 10^{24}$
Нептун	$1,03 \cdot 10^{26}$
Юпитер	$1,9014 \cdot 10^{27}$
Солнце	$1,984 \cdot 10^{30}$
Галактика	$2,2 \cdot 10^{41}$

Россия подписала Метрическую конвенцию в 1875 г. В 1899 г. эталонные метр № 28 и килограмм № 12, по жребию доставшиеся России, были утверждены в ранге государственных эталонов. Но только 11 сентября 1918 г. Со-

вет народных комиссаров принял декрет о введении в РСФСР международной метрической системы мер и весов, и метр и килограмм потеснили в России традиционные аршин<sup>1</sup> и пуд<sup>2</sup>.

В 1899 г. эталонный килограмм № 12, по жребью доставшийся России, был утвержден государственным эталоном, и с тех пор хранится под двумя стеклянными колпаками на подставке из горного хрусталя в сейфе с постоянной температурой и влажностью в Институте метрологии им. Д. И. Менделеева в Санкт-Петербурге. С ним периодически сличают на специальных метрологических весах вторичные эталоны. Чтобы избежать даже малейших толчков, весы установлены на фундаменте глубиной 7 м, не связанном с основным зданием, а управляются дистанционно из соседнего помещения.



Масса — это свойство тела, характеризующее его инертность. При одинаковом воздействии со стороны окружающих тел одно тело может быстро изменять свою скорость, а другое в тех же условиях — значительно медленнее. Принято говорить, что второе из этих двух тел обладает большей инертностью, или, другими словами, второе тело обладает большей массой.

-----

Масса тела — *скалярная величина*. Опыт показывает, что если два тела с массами  $m_1$  и  $m_2$  соединить в одно, то масса  $m$  составного тела оказывается равной сумме масс  $m_1$  и  $m_2$  этих тел:

$$m = m_1 + m_2. \quad (71)$$

Это свойство масс называют **аддитивностью**<sup>3</sup>.

### Контрольные вопросы

- ? Какой величиной характеризуется инертность тела?
- ? Какова связь между массами тел и модулями ускорений, которые они получают при взаимодействии?
- ? Как определяется масса отдельного тела и в чем она измеряется?
- ? Каким способом измеряют массу?

<sup>1</sup> 0,7112 м.

<sup>2</sup> 16,3805 кг.

<sup>3</sup> В масштабах ядра этой свойство не выполняется.

? Что представляет собой эталон массы?

? Дайте определение единицы силы в системе СИ.

### 3.8. Импульс

Ранее (см. разд. 3.6) мы ввели понятие инертной массы как коэффициент пропорциональности между силой и ускорением, вызванным этой силой. Фактически же понятие массы было введено в механику Ньютоном в определении импульса (количества движения) тела как коэффициент пропорциональности (постоянный для уравнения движения) между импульсом и скоростью свободного движения тела.

**Импульс (количество движения)** — в нерелятивистской механике Ньютона — мера механического движения, представляющая собой векторную величину, равную для материальной точки произведению массы этой точки на ее скорость и направленную так же, как вектор скорости. Импульсом обладают все формы материи, в том числе электромагнитное и гравитационное поля. Единицей измерения импульса в СИ является килограмм-метр в секунду ( $\text{кг}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$ ).

С другой стороны, основываясь на втором законе Ньютона, можно ввести и понятие **импульса силы**  $F\Delta t = m\Delta v$ , как меры действия силы взаимодействия за некоторый промежуток времени, и равного произведению среднего значения силы на время ее действия. Импульс силы также является векторной величиной.

Импульсом  $\mathbf{p}$  системы частиц (материальных точек) называют векторную сумму импульсов  $\mathbf{p}_i = m_i\mathbf{v}_i$  отдельных частиц:

$$\mathbf{p} = \sum_i m_i\mathbf{v}_i. \quad (72)$$

Таким образом, *второй закон Ньютона*: скорость изменения импульса тела равна действующей на тело силе  $\mathbf{F}$ :

$$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt} \quad (73)$$

или импульс силы равняется изменению импульса тела:

$$\mathbf{F}\Delta t = \Delta\mathbf{p}. \quad (74)$$

Именно в таком общем виде (74) сформулировал второй закон сам Ньютон. Сила  $\mathbf{F}$  в этом выражении представляет собой равнодействующую всех сил, приложенных к телу.

## Контрольные вопросы

- ? Дайте определение импульса силы и импульса тела. В каких единицах измеряют эти величины?
- ? Какова единица измерения импульса тела в системе СИ?

### 3.9. Третий закон Ньютона

Всякое действие тел друг на друга носит характер *взаимодействия*: если тело 1 действует на тело 2 с силой  $F_1$ , то и тело 2 в свою очередь действует на тело 1 с силой  $F_2$ .



Всякой силе, приложенной к какому-то телу, можно сопоставить равную ей по величине и противоположно направленную силу, приложенную к другому телу, взаимодействующему с данным.

**Третий закон Ньютона:** силы, с которыми действуют друг на друга взаимодействующие тела, равны по величине и противоположны по направлению:

$$F_{12} = -F_{21}. \quad (75)$$

Принципиально важно, что эти силы приложены к разным телам, и поэтому не могут компенсировать (уравновешивать) друг друга. Складывать по правилам векторного сложения можно только силы, приложенные к одному телу.

Иллюстрация третьего закона Ньютона приведена на рис. 39: человек действует на груз с такой же по модулю силой, как и груз действует на человека. Эти силы направлены в противоположные стороны. Они имеют одну и ту же физическую природу — это упругие силы каната. Сообщаемые обоим телам ускорения обратно пропорциональны массам тел.

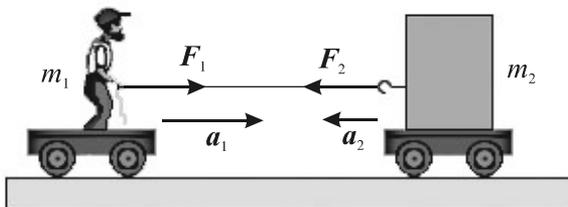


Рис. 39. Третий закон Ньютона:  $F_1 = -F_2$ ,  $a_1 = -\frac{m_2}{m_1}a_2$

Силы, действующие между частями одного и того же тела, называют **внутренними**. Если тело движется как единое целое, то его ускорение определяется только внешней силой.

В качестве примера рассмотрим рис. 40, на котором изображены два тела с массами  $m_1$  и  $m_2$ , жестко связанные между собой невесомой нерастяжимой нитью и двигающиеся с одинаковым ускорением  $a$  как единое целое под действием внешней силы  $F$ .

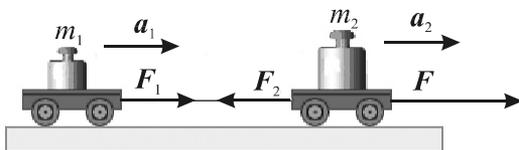


Рис. 40. Исключение внутренних сил

Между телами действуют внутренние силы, подчиняющиеся третьему закону Ньютона ( $F_1 = -F_2$ ). Движение каждого тела зависит от сил взаимодействия между ними. Второй закон Ньютона, примененный к каждому телу в отдельности, дает:

$$m_1 a_1 = F_1, \quad m_2 a_2 = F_2 + F. \quad (76)$$

Складывая левые и правые части этих уравнений и принимая во внимание, что  $a_1 = a_2 = a$  и  $F_2 = -F_1$  получим:

$$(m_1 + m_2) a_2 = F_1 + F_2 + F = F. \quad (77)$$

Третий закон Ньютона остается справедливым во всех системах отсчета. В этом законе речь идет не о любых силах, а о силах взаимодействия тел.

Третий закон Ньютона иногда называют **законом действия и противодействия**. "Если кто нажимает пальцем на камень, — писал Ньютон, — то и палец его также нажимается камнем. Если лошадь тащит камень, привязанный к канату, то и обратно она с равным усилием оттягивается к камню...".

Ньютон писал: "...Если бы одно из тел  $A$  притягивалось бы телом  $B$  сильнее, нежели тело  $B$  притягивается телом  $A$ , то препятствие (между телами вымышленное препятствие, мешающее их сближению) испытывало бы со стороны тела  $A$  большее давление, нежели со стороны тела  $B$  и, следовательно, не осталось бы в равновесии. Преобладающее давление вызвало бы движение системы, состоящей из двух тел и препятствия, в сторону тела  $B$ , и в свободном пространстве эта система, двигаясь ускоренно, ушла бы в

бесконечность. Такое заключение нелепо и противоречит первому закону, по которому система должна бы оставаться в своем состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения. Отсюда следует, что оба тела дают на препятствие с равными силами, а значит, и притягиваются взаимно с таковыми же".

Приняв массу какого-либо тела за эталон, можно по результатам взаимодействия с ним найти массы других тел. Определенная таким образом масса выступает как количественная мера инертности тела. Иными словами, чем больше масса тела, тем более оно инертно, т. е. тем меньше изменяется его скорость при взаимодействии с выбранным эталоном.

Масса любого тела может быть определена на опыте путем сравнения с массой эталона ( $m_{эм} = 1$  кг). Пусть  $m_1 = m_{эм} = 1$  кг. Тогда (рис. 41):

$$\frac{m_1}{m_2} = -\frac{a_2}{a_1} m_{эм}. \quad (78)$$

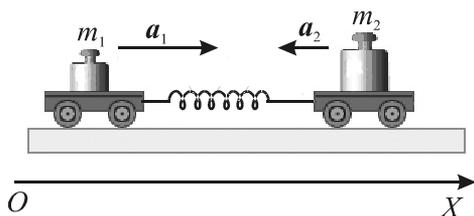


Рис. 41. Сравнение масс двух тел

С момента выхода в свет "Математических начал" Ньютона прошли уже сотни лет. Открыты новые законы природы, являющиеся не менее фундаментальными, а иногда и более общими, чем законы Ньютона. Но даже такой яростный критик Ньютона, как Мах, признавал, что законы Ньютона позволяют "без привлечения какого-нибудь нового принципа рассмотреть каждый практически возможный случай механики. Если при этом возникают затруднения, то это всегда только затруднения математического (формального), но никогда не принципиального характера".



Механика Ньютона хорошо описывает движение тел с относительно малыми скоростями. Когда же речь идет о скоростях, сравнимых со скоростью света, то законы Ньютона приходится заменять другими (см. разд. 10.1).

### Контрольные вопросы

- ? Сформулируйте третий закон Ньютона и проиллюстрируйте его опытами.
- ? Уравновешиваются ли взаимно силы действия и противодействия? Обоснуйте ответ.
- ? Как направлены ускорения взаимодействующих между собой тел?
- ? Могут ли уравновешивать друг друга силы, с которыми взаимодействуют между собой тела?
- ? Приведите примеры проявления третьего закона Ньютона.

## 3.10. Закон сохранения импульса

При взаимодействии тел *импульс* одного тела может частично или полностью передаваться другому телу. Если на систему тел не действуют внешние силы со стороны других тел, такую систему называют замкнутой.

**Замкнутая (изолированная) система** — такая система *материальных точек* (тел), в которой материальные точки (тела) взаимодействуют только между собой, не испытывая действия со стороны других материальных точек (тел), находящихся вне данной системы.

Из *второго и третьего законов Ньютона* следует, что производная полного импульса двух взаимодействующих материальных точек равна нулю. Следовательно, вектор полного импульса точек должен быть постоянным (**закон сохранения импульса для изолированной системы, состоящей из двух материальных точек (тел)**):

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 u_1 + m_2 u_2, \quad (79)$$

где  $u_1$  и  $u_2$  — скорости материальных точек (тел) после их взаимодействия, или:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = \text{const}. \quad (80)$$




---

Полный импульс замкнутой системы двух взаимодействующих точек (тел) остается постоянным. На сколько уменьшается импульс одной точки (тела), на столько же увеличивается импульс другой точки (тела).

---

Если рассмотреть не две точки, а большее их число и считать, что между всеми этими точками существуют силы взаимодействия, то для каждой пары из совокупности должен выполняться *третий закон Ньютона*. Распространяя рассуждения на всю совокупность точек, приходим к выводу, что полный

импульс такой системы материальных точек, равный векторной сумме импульсов отдельных составляющих, также должен быть постоянным. Выбор этой постоянной величины диктуется начальными условиями.

Геометрическая сумма всех импульсов точек (тел) изолированной системы остается постоянной при любых взаимодействиях между точками (телами) этой системы:

$$m_1 \mathbf{v}_1 + m_2 \mathbf{v}_2 + \dots + m_n \mathbf{v}_n = \text{const} . \quad (81)$$

Под действием сил импульс  $\mathbf{p}_i$  каждой точки изменяется. По *второму закону Ньютона*:

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{p}_1}{dt} &= \mathbf{f}_{12} + \dots + \mathbf{f}_{1n} + \mathbf{F}_1, \\ &\dots \\ \frac{d\mathbf{p}_n}{dt} &= \mathbf{f}_{n1} + \dots + \mathbf{f}_{n-1} + \mathbf{F}_n, \end{aligned}$$

где  $\mathbf{F}_i$  — сумма всех внешних сил, действующих на точку массой  $m_i$ .

Суммируя эти выражения, заметим, что в соответствии с *третьим законом Ньютона* сумма всех внутренних сил равна 0, поэтому:

$$\sum_{i=1}^n \frac{d\mathbf{p}_i}{dt} = \frac{d}{dt} \sum_{i=1}^n \mathbf{p}_i = \frac{d\mathbf{p}}{dt} = \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_i = \mathbf{F} ,$$

где  $\mathbf{p} = \sum_{i=1}^n \mathbf{p}_i$  — **полный механический импульс** системы, а  $\mathbf{F}$  — сумма всех внешних сил.




---

Изменение полного импульса определяется только внешними силами. Поскольку в простых механических явлениях сила может проявиться только в результате взаимодействия между телами, то закон сохранения полного импульса системы фактически означает, что невозможно создать движение одного тела, не вызвав одновременно противоположно направленное движение другого тела, с которым данное тело находится во взаимодействии.

-----

Полный импульс удобно представить как произведение массы системы

$$M = \sum_{i=1}^n m_i \text{ на некоторую скорость } V , \text{ определяемую из условия:}$$

$$V = \frac{p}{M} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i v_i}{\sum_{i=1}^n m_i}.$$

Если система представляет сплошное тело, то эта скорость определяется выражением:

$$V = \frac{1}{M} \int v_i dm_i,$$

где интеграл берется по всему объему тела, имеющего массу  $M$ .

Полный импульс системы  $p$  удобно приписать некоей точке, имеющей массу  $M$ . Такую точку называют центром масс или центром инерции, а скорость  $v$  — скоростью центра масс.

**Центр инерции (центр масс)** — геометрическая точка, положение которой характеризует распределение масс в механической системе.

Понятие центра инерции отличается от понятия центра тяжести тем, что последнее имеет смысл только для твердого тела, находящегося в однородном поле тяжести; понятие же центра инерции не связано ни с каким силовым полем и имеет смысл для любой механической системы.

**Теорема о движении центра масс:** при движении механической системы ее центр масс движется так, как двигалась бы материальная точка, имеющая массу, равную массе системы, и находящаяся под действием всех тех же внешних сил, которые были приложены к системе.

### Контрольные вопросы

- ? Что такое замкнутая система тел?
- ? Какую систему тел называют незамкнутой?
- ? В чем состоит закон сохранения импульса? Приведите примеры и опыты, подтверждающие его.

# ГЛАВА 4

## Основы небесной механики. Основы теории тяготения

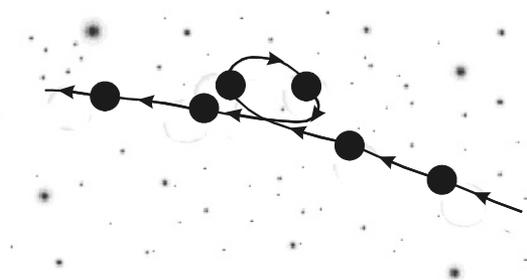
Кто видел простака из поваров такого,  
Который бы вертел очаг вокруг жаркого?

*М. В. Ломоносов*

### 4.1. Законы Кеплера

**Небесная механика** — раздел астрономии, изучающий движения тел *Солнечной системы* в их общем гравитационном поле. В ряде случаев (в теории движения комет, спутников и др.) кроме *гравитационных сил* учитываются *реактивные силы*, давление излучения (см. том "*Оптика и квантовая физика*" данного курса), *сопротивление среды*, изменение массы и другие факторы.

С точки зрения земного наблюдателя планеты движутся по весьма сложным траекториям (рис. 42). Первая попытка создания модели Вселенной была предпринята Птолемеем (~ 140 г.). В центре мироздания Птолемей поместил Землю, вокруг которой по большим и малым кругам, как в хороводе, двигались планеты и звезды.



**Рис. 42.** Условное изображение наблюдаемого движения Марса на фоне неподвижных звезд

Геоцентрическая система Птолемея<sup>1</sup> продержалась более 14 столетий и только в середине XVI в. была заменена гелиоцентрической системой Коперника<sup>2</sup>. В системе Коперника траектории планет оказались более простыми<sup>3</sup>.

До конца XVI в. ученым не удавалось точно рассчитать относительное положение планет на несколько лет вперед. Получалось заметное расхождение теоретических расчетов с результатами наблюдений. Причина заключалась в ошибочном предположении, что планеты равномерно движутся по окружностям вокруг Солнца.

Датский астроном Тихо Браге (Tycho Brahe, 1546—1601 гг.) решил, что нужно внимательно следить за тем, где появляются на небе планеты и точно это записывать. Это было началом современной науки, ключом к правильному пониманию природы — наблюдать за предметом, записывать все подробности и надеяться, что полученные таким способом сведения послужат основой для того или иного теоретического истолкования. Браге, владевший островом поблизости от Копенгагена, оборудовал в 1576 г. этот остров большими бронзовыми кругами и наблюдательными пунктами (обсерватория "Ураниборг") и свыше 20 лет записывал положения планет.

Когда все эти данные были собраны, они попали в руки Кеплера, который и попытался решить, как движутся планеты вокруг Солнца. Он искал решение методом проб и ошибок. Однажды ему показалось, что он уже получил ответ: он решил, что планеты движутся по кругу, но Солнце лежит не в центре. Потом Кеплер заметил, что одна из планет (Марс) отклоняется от нужного положения на 8 угловых минут, и понял, что полученный им результат неверен, т. к. Браге не мог допустить такую большую ошибку. Уверенный в точности наблюдений, он решил пересмотреть свою теорию и, в конце концов, обнаружил три факта, позднее сформулированные как "законы Кеплера".

Сначала (15 мая 1618 г.) Кеплер установил, что планеты движутся вокруг Солнца по эллипсам, и Солнце находится в одном из фокусов.

**Эллипс (овал)** — это геометрическое место точек, сумма расстояний которых от двух заданных точек (фокусов) есть величина постоянная (рис. 43).

Воображаемые траектории, по которым движутся планеты, называются **орбитами**.

---

<sup>1</sup> Сегодня мы знаем, что философская идея Птолемея о Земле — центре мироздания — была ошибочна. Но кинематическое описание движения небесных тел в геоцентрической системе координат вполне допустимо, и им широко пользуются на практике.

<sup>2</sup> В 1992 г. факт обращения планет вокруг Солнца был наконец-то признан и Римской католической церковью.

<sup>3</sup> Позднее общая теория относительности, разработанная Эйнштейном, показала, что обе точки зрения одинаково приемлемы.

**Первый закон Кеплера:** планеты обращаются по эллипсам, в одном из фокусов которых находится Солнце (рис. 44).

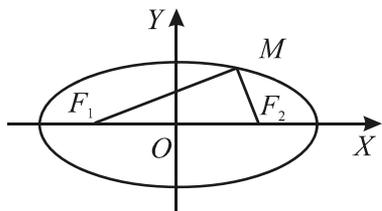


Рис. 43. Эллипс

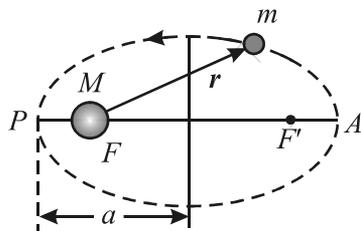


Рис. 44. Эллиптическая орбита планеты массой  $m \ll M$ .  $a$  — длина большой полуоси,  $F$  и  $F'$  — фокусы орбиты

По мере движения планеты по эллиптической орбите ее расстояние от Солнца непрерывно изменяется. Ближайшую к Солнцу точку орбиты называют **перигелием** (P), а наиболее далекую — **афелием** (A). Полусумма перигелийного  $q$  и афелийного  $Q$  расстояний выражает среднее расстояние планеты от Солнца, равное большой полуоси ее орбиты  $a$ :

$$\frac{Q+q}{2} = a. \tag{82}$$

Земля проходит перигелий в начале января, а афелий — в начале июля. В связи с этим зима в северном полушарии короче и мягче, чем в южном, а лето продолжительнее и прохладнее.

Важной характеристикой орбиты является ее **эксцентриситет**  $e$ , определяемый соотношением:

$$\frac{Q-q}{2a} = e. \tag{83}$$

Все планеты *Солнечной системы* движутся по орбитам, близким к круговым (т. е. эксцентриситеты их орбит близки к 0).

Кеплер также обнаружил, что если взять два положения планеты, отделенных друг от друга определенным промежутком времени, потом взять другую часть орбиты и там — тоже два положения планеты, разделенных этим же промежутком времени, и провести линии (радиус-векторы) от Солнца к планете, то площадь, заключенная между орбитой планеты и парой линий, которые отделены друг от друга тремя неделями, одинакова в любой части орбиты (рис. 45). А чтобы эти площади были одинаковые, планета должна идти быстрее, когда она ближе к Солнцу, и медленнее, когда она далеко от него.

**Второй закон Кеплера:** радиус-вектор планеты за равные промежутки времени описывает равновеликие площади (рис. 46).

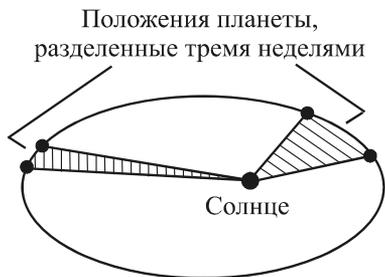


Рис. 45. Ко второму закону Кеплера

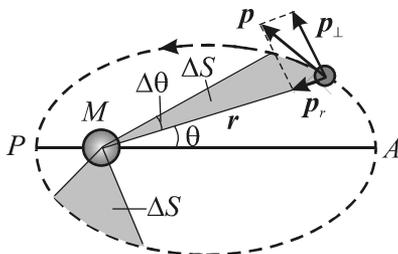


Рис. 46. Закон площадей — 2-й закон Кеплера



Орбитальная скорость планеты изменяется в некоторых пределах: от наибольшей в перигелии до наименьшей в афелии.

Еще через несколько лет Кеплер сформулировал третье правило, которое касалось не движения одной планеты вокруг Солнца, а связывало движение различных планет друг с другом. Оно гласило, что время полного оборота планеты вокруг Солнца зависит от величины орбиты и пропорционально квадратному корню из куба этой величины. А величиной орбиты считается большая полуось эллипса.

**Третий закон Кеплера:** квадраты периодов обращения планет вокруг Солнца относятся между собой как кубы больших полуосей их орбит.

Третий закон Кеплера удобно выразить формулой, по которой можно вычислить относительные расстояния планет от Солнца:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{Q_1^3}{Q_2^3}. \quad (84)$$



Орбита планеты представляет собой эллипс; за равные промежутки времени радиус-вектор планеты описывает равные площади, а время (период) обращения планеты вокруг Солнца пропорционально величине орбиты в степени три вторых, т. е. квадратному корню из куба величины орбиты.

Законы Кеплера были объяснены и уточнены на основе закона всемирного тяготения Ньютона.

### Контрольные вопросы

- ? Каким законам подчиняется движение планет вокруг Солнца?
- ? Чему равен эксцентриситет в случае строго круговой орбиты?

## 4.2. Солнечная система

Современная **астрономия**<sup>1</sup> — это наука о строении и эволюции небесных тел, их систем и Вселенной в целом. Она, в частности, исследует тела в Солнечной системе: Землю, планеты, их спутники, астероиды, кометы и межпланетное вещество. Она изучает Солнце, звезды и их скопления, Млечный путь и другие галактики<sup>2</sup>, скопления и сверхскопления галактик, межзвездное вещество, реликтовое излучение и т. д.

Изучение физических явлений, процессов и закономерностей на Земле тесно связано с изучением внеземных, астрономических объектов. Астрономия сделала множество блестящих открытий, увенчанных Нобелевскими премиями в области физики. Среди них открытие космических лучей (1936 г.), пульсаров (1974 г.), реликтового излучения (1978 г.), солнечных нейтрино (2002 г.), внеземного рентгеновского излучения (2002 г.), объяснение природы источника энергии звезд (1967 г.), возникновения химических элементов Вселенной (1983 г.), строения и эволюции звезд (1983 г.).

**Вселенная** — весь существующий материальный мир, безграничный во времени и пространстве, и бесконечно разнообразный по формам, которые принимает материя в процессе своего развития.

**Галактика** — звездная система (спиральная галактика), к которой принадлежит наше Солнце (рис. 47). Галактика содержит не менее  $10^{11}$  звезд (общей массой  $\approx 10^{11}$  масс Солнца), межзвездное вещество (газ и пыль, масса которых составляет несколько процентов массы всех звезд), космические лучи, магнитные поля, излучение (фотоны). Большинство звезд занимает объем линзообразной формы с поперечником около 30 тыс. пк, концентрируясь к плоскости симметрии этого объема (галактические плоскости) и к центру (плоская подсистема Галактики). Меньшая часть звезд заполняет почти сферический объем радиусом около 15 тыс. пк (сферическая подсистема Галак-

<sup>1</sup> От греч. *astron* — звезда и *nomos* — закон.

<sup>2</sup> От новогреческого *galaktikos* — млечный.

тики), концентрируясь к центру (ядру) Галактики, который находится от Земли в направлении созвездия Стрельца. Солнце расположено вблизи галактической плоскости на расстоянии около 10 тыс. пк от центра Галактики (рис. 48). Для земного наблюдателя звезды, концентрирующиеся к галактической плоскости, сливаются в видимую картину Млечного Пути.

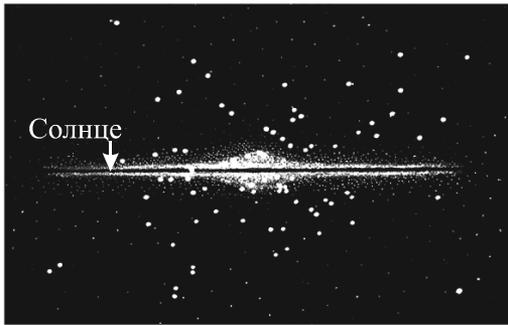


Рис. 47. Галактика. Схематическое изображение. Вид с ребра

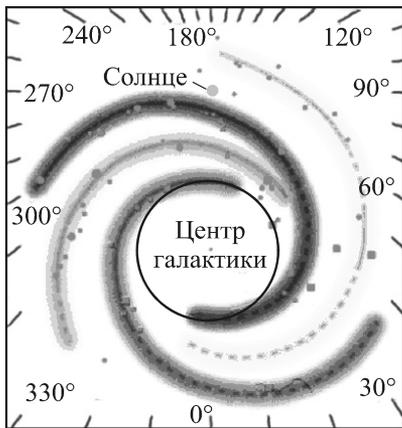


Рис. 48. Место Солнечной системы в Галактике

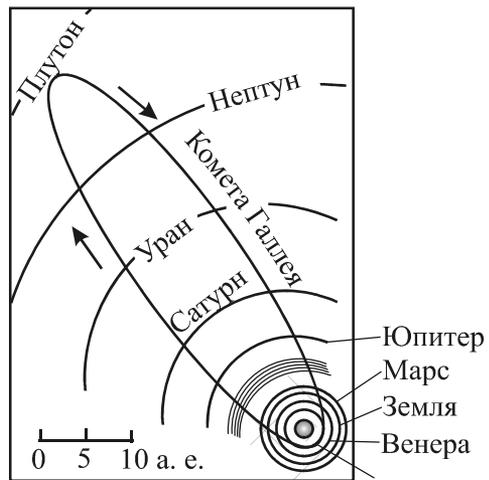


Рис. 49. Солнечная система

Мы живем на одной из планет, обращающихся вокруг Солнца и входящей в состав **Солнечной системы** (Солнце и большие планеты (Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун), а также планеты-карлики и малые тела) (рис. 49).

Расстояние от Солнечной системы до ближайшей к нам звезды равно 4,3 светового года.

Чем дальше находится планета от Солнца, тем меньше ее орбитальная скорость и больше период обращения.

Согласно гипотезе Дж. П. Койпера, выдвинутой в 1949 г., планеты Солнечной системы образовались в газовом облаке, окружавшем протосолнце, в результате гравитационных возмущений. Кроме Земли и планет, сходных с ней (Меркурий, Венера и Марс), имеются планеты-гиганты (Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун). Перечисленные восемь планет, основные сведения о которых приведены в табл. 7, называют **большими планетами**. Основная особенность больших планет состоит в том, что они имеют достаточно сильное гравитационное поле.

Таблица 7. Солнечная система [1]

Небесное тело	Звездный период обращения в земных годах	Среднее расстояние от Солнца, км	Масса (Земля = 1)	Плотность, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$	Экваториальный диаметр, км	Звездный период вращения вокруг оси	Число известных спутников
Меркурий	0,241	$58\cdot 10^6$	0,055	5500	4878	58,65 сут.	0
Венера	0,615	$108\cdot 10^6$	0,805	5250	12104	243,0 сут.	0
<b>Земля</b>	<b>1,00004</b>	<b><math>150\cdot 10^6</math></b>	<b>1,000</b>	<b>5520</b>	<b>12756</b>	<b>23 ч 56 мин 4 с</b>	<b>1</b>
Луна <sup>1</sup>		$384\ 000^2$	0,012	3343	3480	27 сут. 7 ч 43 мин 11 с	0
Марс	1,881	$228\cdot 10^6$	0,106	3940	6974	24 ч 37 мин 23 с	2
Юпитер	11,86	$778,3\cdot 10^6$	314,0	1330	142 800	9 ч 50 мин	61
Сатурн	29,46	$1426\cdot 10^6$	94,01	700	120 660	10 ч 14 мин	31
Уран	84,01	$2869\cdot 10^6$	14,4	1100	53 000	10,8 ч	21
Нептун	164,8	$4496\cdot 10^6$	17,0	1500	49 500	17,7 ч	13
Плутон	248,9	$5929\cdot 10^6$	0,002	400	2300	6,4 сут.	1
Солнце			333 000	1409	1 392 000	25,5 сут.	—

<sup>1</sup> Спутник Земли.

<sup>2</sup> Среднее расстояние от Земли.

Общая масса:

- планет Солнечной системы — 447,8 массы Земли;
- спутников планет Солнечной системы — 0,12 массы Земли;
- малых планет Солнечной системы — 0,0003 массы Земли;
- комет и метеоритного вещества Солнечной системы —  $10^{-9}$  массы Земли;
- планетной системы Солнечной системы — 448 масс Земли.

Как и другие звезды, **Солнце** — это горячий газовый шар, в основном состоящий из водорода, сжатого силой собственного тяготения. При этом средняя плотность Солнца ( $1,4 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ ) превышает плотность воды, а в центре Солнца она значительно выше, чем даже у золота или платины, имеющих плотность около  $20 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ . Поверхность Солнца при температуре  $5800 \text{ К}$  излучает  $6,5 \text{ кВт}\cdot\text{см}^{-2}$ . Излучаемая Солнцем энергия рождается глубоко в его недрах в ходе термоядерных реакций, превращающих водород в гелий. Эта энергия излучается в пространство из **фотосферы** — тонкого слоя солнечной поверхности.

Над фотосферой находится внешняя атмосфера Солнца — **корона**, простирающаяся на много радиусов Солнца и сливающаяся с межпланетной средой. Поскольку газ в короне очень разрежен, его свечение крайне слабо. Плотность газа монотонно снижается от центра Солнца к его периферии, а температура, достигающая в центре  $16\,000\,000 \text{ К}$ , снижается до  $5800 \text{ К}$  в фотосфере, но затем вновь возрастает до  $2\,000\,000 \text{ К}$  в короне. Переходный слой между фотосферой и короной называется **хромосферой**.

Солнечный свет имеет непрерывный спектр с линиями поглощения, обнаруженными немецким физиком Йозефом Фраунгофером (Joseph von Fraunhofer, 1787—1826 гг.) в 1814 г.; они свидетельствуют, что помимо водорода в атмосфере Солнца присутствуют и многие другие химические элементы.

Солнце находится в одном из спиральных рукавов Галактики на расстоянии более половины галактического радиуса от ее центра. Вместе с соседними звездами Солнце обращается вокруг центра Галактики с периодом около  $240\,000\,000$  лет. Основные характеристики Солнца приведены в табл. 8. Солнце вращается вокруг оси в том же направлении, что и Земля (с запада на восток), ось вращения образует угол  $82^\circ 45'$  с плоскостью орбиты Земли (эклиптикой). Но поскольку Солнце не твердое тело, разные области его фотосферы вращаются с разной скоростью: период вращения на экваторе  $25$  сут., а на широте  $75^\circ$  —  $31$  сут.

Магнитные поля участвуют во всех процессах на Солнце. Временами в небольшой области солнечной атмосферы возникают концентрированные маг-

нитные поля, в несколько тысяч раз более сильные, чем на Земле. У Солнца отмечается 11-летний цикл активности. В течение этого периода нарастает и вновь убывает количество солнечных пятен, вспышек в хромосфере и протуберанцев (плотных холодных облаков водорода, конденсирующихся в короне).

4 большие планеты земной группы (Венера, Земля, Марс, Юпитер) представляют собой каменные образования.

**Таблица 8.** Характеристики Солнца

Диаметр	$1,39 \cdot 10^6$ км	
Масса	$1,99 \cdot 10^{30}$ кг	
Расстояние от Земли (среднее)	$1,49 \cdot 10^8$ км	
Интенсивность видимого излучения	$2,5 \cdot 10^{27}$ кд <sup>1</sup>	
Интенсивность полного излучения	$3,9 \cdot 10^{26}$ Вт	
Солнечная постоянная (поток излучения на 1 м <sup>2</sup> земной поверхности)	$1,1 \cdot 10^3$ Вт	
	<b>Температура, К</b>	<b>Плотность, г·см<sup>-3</sup></b>
Центр	16 млн	160
Фотосфера	5800	$1,7 \cdot 10^{-7}$
Корона	2 млн	$2 \cdot 10^{-16}$

**Нижние планеты** — планеты Меркурий и Венера, находящиеся к Солнцу ближе, чем Земля.

Планета, которая расположена ближе всего к Солнцу, называется **Меркурий**. Вращаясь со скоростью  $50 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ , Меркурий совершает полный оборот вокруг Солнца за 88 дней, быстрее всех остальных планет. Расстояние между Меркурием и Солнцем очень маленькое, поэтому температура поверхности планеты достигает  $467 \text{ }^\circ\text{C}$ , но из-за того, что у Меркурия практически нет атмосферы, ночью температура падает до  $183 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Венера** — самая "необычная" планета Солнечной системы. Венера обладает самой плотной атмосферой среди планет "земной" группы, самым медленным вращением вокруг оси, происходящим в обратном направлении относительно

<sup>1</sup> Кандела — единица силы света.

других планет, и наиболее близкой к окружности орбитой. К тому же, продолжительность суток на Венере (243,01 земных суток) больше, чем продолжительность года (224,70 земных суток). Среднее расстояние Венеры от Солнца — 108 200 000 км (0,72 а. е.); экваториальный диаметр — 12 104 км; скорость движения по орбите —  $35,03 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ ; температура на поверхности — до  $480 \text{ }^\circ\text{C}$ ; масса —  $4,87 \cdot 10^{24} \text{ кг}$  (0,81 массы Земли); средняя плотность вещества —  $5,25 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ ; ускорение свободного падения на поверхности —  $8,7 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$  (0,9 земного); эксцентриситет орбиты — 0,007.

Масса атмосферы Венеры примерно в 100 раз превышает массу атмосферы Земли. Преобладающую долю атмосферы составляет углекислый газ (~97%); азот — около 3%; водяной пар — менее десятой доли процента, кислород — тысячные доли процента. В очень малых количествах имеются также примеси  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ . Облака Венеры состоят в основном из 75—80%-й серной кислоты. Концентрация водяного пара увеличивается с высотой, достигая максимума на высоте около 50 км, где она в сто раз выше, чем у твердой поверхности, т. е. доля пара на этой высоте приближается к 1%.

Температура на поверхности Венеры (на уровне среднего радиуса планеты) — около 750 К, причем ее суточные колебания незначительны. Давление — около 100 атм., плотность газа почти на два порядка выше, чем в атмосфере Земли. Благодаря парниковому эффекту (см. том "*Оптика и квантовая физика*" данного курса) возле поверхности Венеры исключено всякое существование жидкой воды.

В самом конце XVIII в. удалось определить массу **Земли**. Высокоточное определение массы Земли впервые выполнил английский ученый Генри Кавендиш (Henry Cavendish, 1731—1810 гг.). Так как к тому времени размеры нашей планеты были уже хорошо известны, то нетрудно было рассчитать и ее среднюю плотность. Согласно Кавендишу средняя плотность Земли составляла —  $5,45 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$  (по современным данным —  $5,52 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ ). Таким образом, средняя плотность нашей планеты оказалась примерно в два раза выше, чем плотность горных пород, обычно встречаемых у ее поверхности. Это однозначно указывало на то, что внутренние области земного шара заполнены каким-то весьма плотным веществом.

Суточное вращение Земли вокруг своей оси происходит с запада на восток, или против часовой стрелки, если смотреть с Северного полюса мира. Вращение Земли вызывает смену дня и ночи, определяет длительность суток. Происходит неравномерно: под влиянием главным образом лунных и солнечных приливов (приливного трения) длительность суток непрерывно возрастает на 1—2 мс в столетие, а из-за сезонных изменений (выпадения осадков и т. п.), тектонических процессов и др. в течение года колеблется в пре-

делах 1—2 мс. Положение оси вращения Земли, а следовательно, и земных географических полюсов изменяется из-за *прецессии* и *нутации*.

Смена времен года на Земле обусловлена наклоном ее оси вращения к плоскости орбиты (под углом  $66^{\circ}33'$ ) и движением Земли по орбите вокруг Солнца. Наклон оси и постоянство ее направления в пространстве приводят к тому, что в один период года Солнце освещает больше Северное полушарие, в другой — Южное, происходит смена времен года. Астрономическое начало времен года в Северном полушарии совпадает с моментами прохождения Солнца через точку весеннего равноденствия (20—21 марта), точку летнего солнцестояния (21—22 июня), точку осеннего равноденствия (23 сентября) и точку зимнего солнцестояния (21—22 декабря). Астрономическая длительность времен года: весны — 92,8, лета — 93,6, осени — 89,8, зимы — 89,0 сут., но в разных климатических зонах длительность времен года различна.

**Марс** несколько веков пристально изучался с Земли. За красноватый цвет его прозвали Кровавой планетой. При наблюдении Марса в телескоп на нем можно различить несколько потемнений на фоне красно-оранжевого фона. Эти темные участки впервые описал Гюйгенс в 1659 г. Почти в то же время, в 1704 г. французский астроном (итальянец по национальности) Джованни Доменико (Жан Доменик) Кассини (Jean Dominique Cassini, 1625—1712 гг.) рассмотрел у полюсов Марса светлые участки, которые назвали полярными шапками. В 1887 г. американец Асаф Холл (Asaph Hall, 1829—1907 гг.) открыл у планеты два спутника, которые назвали Фобосом<sup>1</sup> и Деймосом<sup>2</sup>, а итальянский астроном Джованни Вирджинио Скиапарелли (Giovanni Virginio Schiaparelli, 1835—1910 гг.) составил первую карту поверхности Марса.

Было установлено, что атмосфера на Марсе (состоящая, в основном, из углекислого газа с незначительными примесями водяных паров и кислорода) разрежена, т. к. Марс не способен долго удерживать возле себя молекулы газов. В отдаленном будущем атмосфера, видимо, совсем растворится в пространстве. В настоящий момент ее давление у поверхности в лучшем случае составляет лишь 1% от нормального земного атмосферного давления. Однако втрое меньшая сила тяжести на поверхности Марса позволяет даже такому разреженному газу поднимать миллионы тонн пыли.

На Марсе из-за низкого давления не может быть жидкой воды — она присутствует либо в газообразном состоянии, либо в виде льда. Замерзающие углекислый газ и водяной пар образуют полярные шапки, размер которых с движением Марса по орбите изменяется. На Марсе происходит смена времен

---

<sup>1</sup> От греч. *phóbos* — "Страх".

<sup>2</sup> От греч. *déimos* — "Ужас".

года (по тем же причинам, что и на Земле). Зимой в Северном полушарии полярная шапка растёт, а в Южном почти исчезает: там лето. Южная шапка зимой разрастается до половины расстояния полюс-экватор, а северная — только до трети. Так как орбита Марса весьма вытянута (угол орбиты составляет  $25,19^\circ$ ), то один и тот же сезон в разных полушариях Марса протекает по-разному. В южном полушарии планеты зима более холодная, а лето более теплое. Летом Марс проходит ближайший к Солнцу участок своей орбиты, а зимой — самый удаленный.

На Марсе есть слабое магнитное поле, в 800 раз уступающее по напряженности земному. Это наводит на мысль о том, что у планеты есть хотя бы частично расплавленное металлическое ядро (табл. 9).

**Таблица 9.** Основные физические параметры Марса

Параметр	Величина
Экваториальный радиус	3393,4 км
Полярный радиус	3375,8 км
Сжатие (динамическое)	$5,22 \cdot 10^{-3}$
Средний сферический радиус	$(3389,92 \pm 0,40)$ км
Площадь поверхности	$1,45 \cdot 10^{18}$ см <sup>2</sup>
Объем	$1,632 \cdot 10^{26}$ см <sup>3</sup>
Масса	$(6,418 \pm 0,030) \cdot 10^{26}$ г
Средняя плотность	$(3,934 \pm 0,002)$ г·см <sup>-3</sup>
Ускорение свободного падения на экваторе	$3,713$ м·с <sup>-2</sup>
Скорость убегания (освобождения)	$5,2$ км·с <sup>-1</sup>

Марс удален от Солнца в среднем на 228 000 000 км. Весь свой путь вокруг Солнца Марс проходит за 687 дней, или за 1 год и 11 месяцев. Поскольку Марс и Земля движутся в одну и ту же сторону, Земля через каждые 2 года и 50 дней обгоняет Марс на целый оборот; в это время Марс и Земля находятся по одну сторону от Солнца, приблизительно на одной прямой линии. Такое положение Марса по отношению к Земле астрономы называют **противостоянием**.

Дальние 4 планеты-гиганты (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун) — это газовые образования.

Среднее расстояние **Юпитера** от Солнца — 5,2 а. е. или 778,3 млн км, период обращения — 11,86 года, период вращения (облачного слоя близ экватора)

около 10 ч, экваториальный диаметр — 142 800 км, масса  $1,90 \cdot 10^{27}$  кг. Состав атмосферы:  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $NH_3$ , He. Юпитер — мощный источник теплового радиоизлучения, обладает радиационным поясом и обширной магнитосферой. Юпитер имеет 16 крупных спутников, а также кольцо шириной около 20 000 км, почти вплотную примыкающее к планете.

**Сатурн** — шестая по расстоянию от Солнца планета (среднее расстояние — 9,54 а. е.), период обращения — 29,46 года, период вращения на экваторе (облачный слой) 10,2 ч, экваториальный диаметр — 120 660 км, масса —  $5,68 \cdot 10^{26}$  кг, имеет свыше 17 спутников, в состав атмосферы входят  $CH_4$ ,  $H_2$ , He,  $NH_3$ . У Сатурна обнаружены радиационные пояса. Сатурн — планета, имеющая кольца, образованные огромным множеством мелких спутников Сатурна (толщина колец менее 1 км, внешний диаметр около 300 000 км).

**Уран** был первой планетой, которая была "открыта". Ось планеты наклонена к орбитальной оси на  $98,5^\circ$ . Поэтому каждый из полюсов некоторое время обращен прямо на Солнце, а затем на полгода уходит в тень. Атмосфера Урана содержит в основном водород, 12—15% гелия и немного других газов. Температура атмосферы около 50 К, хотя в верхних разреженных слоях она поднимается до 750 К днем и 100 К ночью. Магнитное поле Урана по напряженности у поверхности немного слабее земного, а его ось наклонена к оси вращения планеты на  $55^\circ$ .

**Нептун** — восьмая по удаленности от Солнца планета (среднее расстояние от Солнца — 30,06 а. е. или 4496 млн км). Период обращения — 164,8 года, период вращения — 17,7 ч, экваториальный диаметр — 49 500 км, масса —  $1,03 \cdot 10^{26}$  кг, состав атмосферы:  $CH_4$ ,  $H_2$ , He. Открыт в 1846 г. И. Галле по теоретическим предсказаниям У. Ж. Лаверье́ и английского астронома и математика Джона Кауча Адамса (J.C. Adams, 1819—1892 гг.). В 2004 г. международная группа астрономов обнаружила 5 неизвестных спутников Нептуна, доведя их количество до 13. Новые спутники имеют наклоненные эксцентричные орбиты. При этом два из них вращаются по орбите в том же направлении, в каком вращается сама планета, а три движутся в противоположном. Все вновь открытые спутники Нептуна имеют диаметр от 30 до 50 км.

До недавнего времени самой далекой планетой Солнечной системы считался **Плутон**. В начале XX в. американский астроном Персиваль Лоуэлл (Percival Lowell, 1855—1916 гг.), основавший в Flagstaff (США, Аризона) обсерваторию Lowell Observatory, активно заинтересовался возможностью существования планеты еще более далекой, чем Нептун. Он заново исследовал орбиту Урана и пришел к выводу, что кажущиеся ошибки наблюдений можно было бы существенно уменьшить, если учесть возмущения Урана неизвестной планетой. Вычисленные Лоуэллом орбита и положения планеты не были опубликованы до 1914 г., хотя поиски планеты он начал с 1905 г. В 1929 г.

было завершено сооружение нового телескопа. А 12 марта 1930 г. было опубликовано сообщение об обнаружении Плутона. Автором открытия был молодой любитель астрономии Клайд Томбо.

Последующие вычисления орбиты, выполненные на основании фотографий звездного неба, сделанных еще до открытия новой планеты, показали, что она движется вокруг Солнца с периодом 246,5 года. Точная оценка диаметра Плутона была сделана Койпером в 1950 г., который установил, что диаметр планеты 5900 км. В ночь с 28 на 29 апреля 1965 г. Плутон должен был пройти вблизи звезды 15-й звездной величины, причем так близко, что мог закрыть ее, если бы его диаметр был равен определенному Койпером. Двенадцать обсерваторий следили за блеском звезды, но он не ослабел ни на секунду. Это означало, что диаметр Плутона не превосходит 5500 км. Позже было установлено, что по размеру (2300 км) Плутон меньше не только Меркурия, но даже Луны.

При взгляде на план Солнечной системы (см. рис. 48) может создаться впечатление, что орбиты Нептуна и Плутона пересекаются. Это впечатление ошибочно, т. к. орбита Плутона наклонена на угол  $17^\circ$  к плоскости эклиптики и орбиты Нептуна, причем линия узлов расположена так, что как раз в районе кажущихся "точек пересечения" Плутон находится на 10 а. е. севернее эклиптики. Более того, из-за соизмеримости периодов обращения Нептуна и Плутона (три периода Нептуна почти равны двум периодам Плутона) расстояние между обеими планетами никогда не может быть меньше 18 а. е.

Плотность Плутона ( $1,4 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ ) — почти как у спутника Юпитера Каллисто. В 1955 г. американские астрономы М. Уокер и Р. Харди определили период вращения Плутона вокруг оси — 6 суток 9 часов 16,9 минуты. Спустя 12 лет советский астроном Р. И. Киладзе подтвердил этот период по собственным наблюдениям. У Плутона был открыт спутник Харон. Плутон остается наименее изученным в Солнечной системе — вот почему приведенные данные расходятся с указанными в табл. 7.

**Малые планеты (астероиды)** — малые тела Солнечной системы с диаметром от 1 до  $\sim 1000$  км. В настоящее время известно около 150 000 малых планет. Это окаменелые фрагменты, оставшиеся со времен образования Солнечной системы. Впервые слово "астероид"<sup>1</sup> было использовано в 1802 г. английским астрономом Уильямом (Фридрихом Вильгельмом) Гершелем (Sir William Herschel, 1738—1822 гг.) для описания этих небесных тел.

Самые известные из малых планет: Паллада, Юнона, Веста, Эрот, Амур, Гидальго, Икар (рис. 50). Орбиты большинства малых планет находятся между

---

<sup>1</sup> "Подобный звезде" (греч.).

орбитами Марса и Юпитера. Этот район Солнечной системы называется "Пояс Астероидов" или "Главный Пояс". В этом поясе находится около миллиона астероидов, по размеру сильно отличающихся друг от друга.

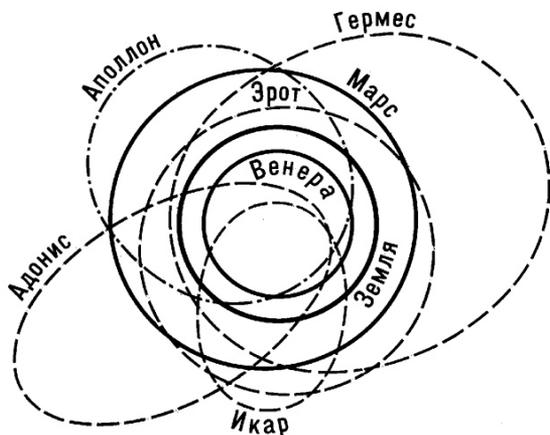


Рис. 50. Орбиты некоторых малых и больших планет

Так как астероиды вращаются вокруг Солнца по эллиптической орбите, большая гравитационная сила Юпитера, или столкновение с Марсом или другим астероидом могут изменить траекторию полета астероида и выкинуть его с орбиты Главного Пояса на орбиту какой-нибудь планеты. Например, спутники Марса Фобос и Деймос могли быть подобными астероидами. Возможно именно такие "заблудившиеся" астероиды могли врезаться в Землю и сыграть определенную роль в геологической истории и эволюции жизни на нашей планете.

За несколько последних десятилетий при помощи спектроскопа (см. том "Оптика и квантовая физика" данного курса) астрономы научились определять химический состав астероидов по свету, который они отражают. Около  $3/4$  астероидов имеют очень темную окраску, что свидетельствует о наличии в них большого количества углерода; их называют углистыми (тип С). Около  $1/6$  всех астероидов имеют красный цвет, их называют каменно-железными телами (тип В).

В 1998 г. чуть дальше Плутона был открыт первый транснептуновый объект — Хаос. В начале 2004 г. космический телескоп Spitzer обнаружил новую малую планету, вращающуюся вокруг Солнца по дальней орбите. Обнаруженная малая планета названа Седной (Sedna) по имени эскимосской богини океана. Седна имеет около 2000 км в диаметре (рис. 51). По предварительным подсчетам, Седна находится от Земли на расстоянии примерно

10 млрд км в "Поясе Купера"<sup>1</sup>. В нем существует множество космических объектов — как мелких, так и достаточно крупных. Ранее планету Седна наблюдал другой космический телескоп — Hubble<sup>2</sup>. Седна стала самым крупным космическим объектом в Солнечной системе, обнаруженным с 1930 г., когда был открыт Плутон. Чуть позже в 15 млрд км от Солнца была открыта Ксена, на 112 км больше Плутона.

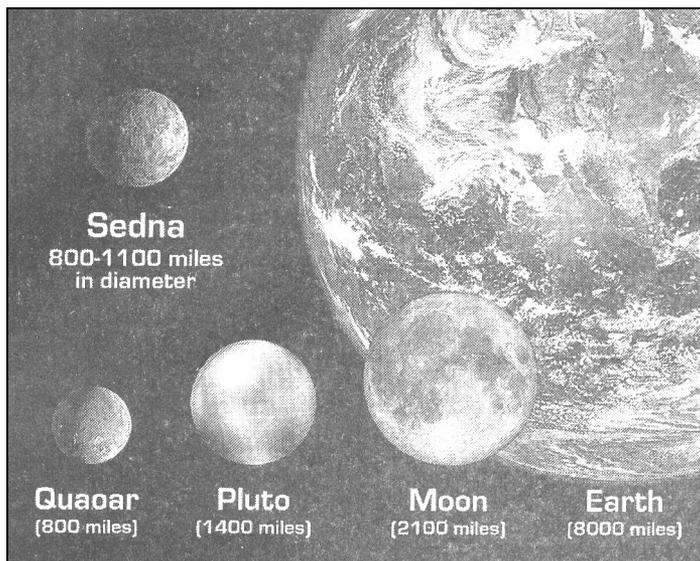


Рис. 51. Седна — малая планета Солнечной системы. Фото Reuters

26 августа 2006 г. решением 28-й Генеральной ассамблеи Международного астрономического союза в Праге Плутон был отнесен к новому классу планет — планет-карликов. Карликовая планета отличается от большой планеты тем, что ее гравитационное поле не может очищать область рядом с ней от других небесных тел. К планетам-карликам, помимо Плутона и других транснептуновых планет, была отнесена и Церера, которая имеет в диаметре 960 км (примерно 1/4 размера Луны). К планетам-карликам стали относить также и Харон (ранее считавшийся спутником Плутона).

Малыми телами Солнечной системы считаются также многочисленные **кометы**. Орбита одной из них (Кометы Галлея) показана на рис. 51. Комета Галлея названа в честь Галлея, предсказавшего ее возвращение в 1758 г. и тем

<sup>1</sup> Другое название — "Пояс Койпера".

<sup>2</sup> Выведен на орбиту в 1990 г., назван в честь американского астронома Эдвина Пауэлла Хаббла (Edwin Powell Hubble, 1889—1953 гг.).

доказавшего, что она член Солнечной системы. Период обращения кометы Галлея — около 76 лет (последний раз сближалась с Солнцем в 1986 г.).

Небольшая часть комет все время находится внутри орбит планет, имея периоды обращения вокруг Солнца от нескольких лет до нескольких десятков лет. Большинство комет движется за пределами орбит планет, но иногда, обращаясь по очень вытянутым эллиптическим орбитам, кометы приближаются к Солнцу.

Кометы, состоящие из грязевого льда, остались с периода образования Солнечной системы и имеют возраст около 4,6 млрд лет, поэтому они несут в себе важную информацию об образовании Солнечной системы.

Легче всего предсказать появление комет, которые обращаются вокруг Солнца менее чем за 200 лет. Большинство из них прилетает из района ледяных тел, который принадлежит орбите Нептуна. Эти тела называют "Объекты Пояса Купера". Сложнее предсказать комету, прилетающую из удаленного района космоса, называемого "Облако Орта", расстояние до которого от Солнца составляет 100 000 а. е. Такой комете понадобится около 30 млн лет, чтобы облететь вокруг Солнца.

Внутри каждой кометы находится маленькое твердое ядро, обычно не более одного километра в диаметре. Это ядро состоит из толстых кусков льда, замерзших газов, каменных частиц и пыли. В центре этого ядра находится камень. Когда комета приближается к Солнцу, она начинает разогреваться, комета становится достаточно яркой, и ее можно увидеть с поверхности Земли. Через отверстия, образованные на обогреваемой Солнцем стороне, могут выходить газ и пыль, которые распространяются на десятки тысяч километров. Постепенно исчезающий материал образует кому, которая может иметь сотни тысяч километров в диаметре.

Солнечный ветер выталкивает частицы атмосферы кометы, образуя длинный и яркий хвост. Этот хвост делится на две части: прямой хвост, состоящий из электрически заряженных ионов, и изгибающийся хвост, состоящий из пыли. Хвост кометы всегда тянется в противоположную от Солнца сторону. Большинство комет пролетают на безопасном расстоянии от Солнца. Однако некоторые кометы подлетают на очень близкое расстояние к Солнцу и даже сталкиваются с Солнцем, в результате чего взрываются и испаряются.



---

Все три категории объектов, составляющих Солнечную систему, отвечают разным физическим событиям. Большие планеты (твердые и газообразные), планеты-карлики в Поясе Купера (куски льда) и малые объекты в поясе астероидов (каменные остатки) отражают разные события в истории образования Солнечной системы.

---

### Контрольные вопросы

- ? Что такое астрономическая единица?
- ? Из каких объектов состоит Солнечная система?

## 4.3. Закон всемирного тяготения. Гравитационные силы

Провозгласив пришествие мессии от науки,  
Кеплер разогнал тучи, скрывшие небосвод.  
И Слово стало человеком, Слово прозрения Бога,  
Коего почитал Платон, и нарекли человека Ньютоном.  
Он пришел и открыл высший закон,  
Вечный, универсальный, единственный и неповтори-  
мый, как сам Бог,  
И смолкли миры, и он изрек: "ТЯГОТЕНИЕ",  
И это слово было самым словом творения.

*А. Ампер<sup>1</sup>*

Первые высказывания о тяготении как всеобщем свойстве тел относятся к античности. В XVI и XVII вв. в Европе возродились попытки доказательства взаимного тяготения тел. Кеплер говорил, что *"тяжесть есть взаимное стремление всех тел"*. Понимая важность этой идеи, он призывал отнестись к ней с вниманием. Кеплер писал: *"Вот истинное учение о тяжести: тяжесть есть взаимная склонность между родственными телами, стремящимися слиться воедино... Если бы в каком-нибудь месте мира находились два камня на близком расстоянии друг от друга и вне сферы действия какого бы то ни было родственного им тела, то эти камни стремились бы соединиться друг с другом, подобно двум магнитам, где-нибудь посередине этого расстояния, и пути, которые им пришлось бы пройти, были бы обратно пропорциональны их массам"*. Особенно тщательно Кеплер рассмотрел взаимодействие Земли и Луны. Он считал, что не только Земля притягивает Луну, но и Луна Землю. Именно этим и вызваны приливы и отливы на нашей планете. *"Если бы Земля перестала притягивать свои воды, — писал Кеплер, — то все воды морей поднялись бы и втекли в тело Луны"*.

Галилей вынужден был признаться, что не понимает, *"какой принцип и какая сила движет камень вниз... мы не знаем ничего, за исключением названия"*. Поскольку Галилею не удалось установить причину падения тел, он продолжал по-прежнему называть его *"естественным"*. Вместо того чтобы рассмотреть причины падения тел, Галилей предлагает рассмотреть закономерности, которым оно подчиняется. Результатом стала гипотеза равноускоренного

<sup>1</sup> Андре-Мари Ампер (Ampère, 1775—1836 гг.) — французский физик.

движения: движение падающих тел является таким, при котором их скорость за равные промежутки времени увеличивается на одну и ту же величину.

Чтобы проверить так это или нет, Галилей поступил следующим образом. Сначала он теоретически доказал, что при любом равноускоренном движении пройденный телом путь из состояния покоя пропорционален квадрату времени его движения:

$$S \sim t^2. \quad (85)$$

Однако проверить эту закономерность в опыте с падающими телами Галилей не мог: слишком быстро происходит падение. Для того чтобы увеличить время падения, он провел опыт с наклонным желобом.

Путь, который шарик проходит по наклонной поверхности желоба, оказался пропорционален квадрату времени движения. Это говорит о том, что данное движение является равноускоренным. Однако свободное падение, заключил Галилей, можно рассматривать как предельный случай движения по наклонной плоскости, угол наклона которой стремится к  $90^\circ$ . Отсюда он сделал вывод: свободное падение тоже является равноускоренным.

Среди десяти красивейших экспериментов за всю историю физики этот эксперимент занял восьмое место<sup>1</sup>.

Гук в 1674 г. в "Попытке изучения движения Земли" так говорит о своей теории тяготения: *"Теория эта основывается на трех допущениях: во-первых, что все без исключения небесные тела обладают направленным к их центру притяжением или тяжестью, благодаря которой они притягивают не только свои собственные части, но также и все находящиеся в сфере их действия небесные тела. Во-вторых, все тела, движущиеся прямолинейным и равномерным образом, будут двигаться по прямой линии до тех пор, пока они не будут отклонены какой-нибудь силой и не станут описывать траектории по кругу, эллипсу или какой-нибудь другой менее простой кривой. Согласно третьему допущению силы притяжения действуют тем больше, чем ближе к ним находятся тела, на которые они действуют"*.

Ньютону удалось доказать, что *второй закон Кеплера (см. разд. 4.1)* прямо вытекает из той простой идеи, что все изменения в скорости направлены к Солнцу, даже в случае эллиптической орбиты. Этот закон укрепил Ньютона в мысли, что сила, действующая на планеты, направлена к Солнцу и что, зная, как период обращения разных планет зависит от расстояния до Солнца, мож-

---

<sup>1</sup> По результатам опроса американских физиков, проведенного сотрудником философского факультета Университета штата Нью-Йорк Робертом Кризом (Robert Crease) и историком Brookhaven National Laboratory Стони Брукком (Stony Brook).

но будет определить, как ослабляется сила с расстоянием. Он нашел, что сила обратно пропорциональна квадрату расстояния.

Еще в 1665 г. 23-летний Ньютон предположил, что Луну на орбите удерживают те же силы, которые притягивают предметы к Земле. По его гипотезе между всеми телами Вселенной действуют силы притяжения — гравитационные силы, направленные по линии, соединяющей *центры масс*, как показано на рис. 52. У однородного шара центр масс совпадает с центром шара.

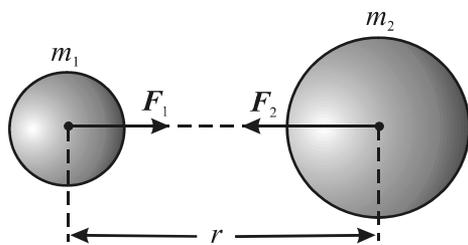


Рис. 52. Гравитационные силы притяжения между телами:  $F_1 = -F_2$

Затем Ньютон сделал еще несколько предсказаний. Ему удалось вычислить, какую форму должна иметь орбита, если закон обратной пропорциональности квадрату расстояния справедлив; он нашел, что орбита должна быть эллипсом.

Ему удалось объяснить и морские **приливы** — периодические колебания уровня моря. Приливы вызваны тем, что Луна притягивает Землю и ее океаны. Так думали и раньше, но вот что оказалось необъяснимым: если Луна притягивает воды и поднимает их над ближней стороной Земли, то за сутки происходил бы лишь один прилив — прямо под Луной (рис. 53, *а*). На самом же деле приливы повторяются примерно через 12 часов, т. е. два раза в сутки. Приверженцы другой школы считали, что Луна притягивает Землю, а вода за ней не успевает (рис. 53, *б*). Ньютон первым понял, что происходит на самом деле: притяжение Луны одинаково действует на Землю и на воду, если они одинаково удалены. Но вода в точке *У* ближе к Луне, чем Земля, а в точке *Х* — дальше. В *У* вода притягивается к Луне сильнее, чем Земля, а в *Х* — слабее. Поэтому получается комбинация двух предыдущих картинок, которая и дает двойной прилив (рис. 53, *в*).

Фактически Земля делает то же самое, что и Луна — она движется по *орбите*. Сила, с которой Луна действует на Землю, уравнивается — но чем? Как Луна движется по орбите, чтобы уравновесить притяжение Земли, точно так же движется по орбите и Земля. Обе они обращаются вокруг общего центра, и силы на Земле уравновешены так, что вода в *Х* притягивается Луной

слабее, в  $Y$  сильнее, и в обоих местах вода вспучивается. Так были объяснены приливы и то, почему они происходят дважды в сутки. Прояснилось и многое другое: как Земля стала круглой из-за того, что все ее части притягивали друг друга, как она оказалась не совсем круглой из-за того, что вращается, и ее наружные части стремятся прочь сильнее, чем внутренние, почему шарообразны Луна и Солнце, и т. д.

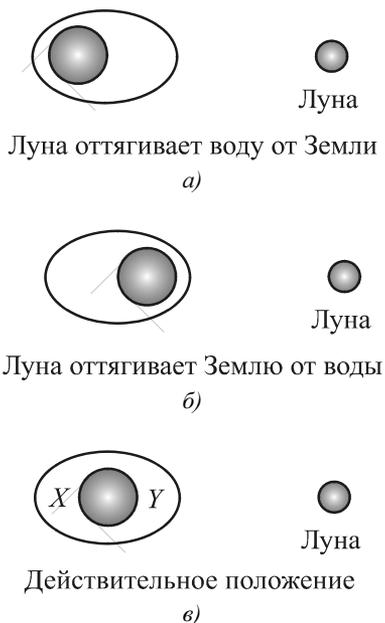


Рис. 53. Механизм приливов по Ньютону

На основании *третьего закона Кеплера* и *второго закона динамики* Ньютон вывел закон всемирного тяготения, окончательную формулировку которого (закон тяготения Ньютона) он дал в 1687 г. в своем главном труде "Математические начала натуральной философии", где он писал: "Брошенный камень отклонится под действием тяжести от прямолинейного пути и, описав кривую траекторию, упадет, наконец, на Землю. Если его бросить с большей скоростью, то он упадет дальше". Далее Ньютон приходит к заключению, что если бы не сопротивление воздуха, то по достижении достаточной скорости траектория делается такой, что камень может и не упасть на Землю, вообще никогда не достигнуть ее поверхности. Этот камень станет двигаться вокруг планеты. Получается, что движение Луны вокруг Земли или Земли вокруг Солнца, — это то же самое падение, но только бесконечно долгое. Причиной такого "падения" является сила тяготения.

**Закон всемирного тяготения (закон тяготения Ньютона):** сила, с которой две материальные точки притягивают друг друга, пропорциональна массам этих точек и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними:

$$\mathbf{F} = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \cdot \frac{\mathbf{r}}{r}, \quad (86)$$

где  $G$  — коэффициент пропорциональности, называемый **гравитационной постоянной** или **постоянной тяготения Ньютона**.

Сила тяготения направлена вдоль прямой, проходящей через взаимодействующие материальные точки.

Направление вектора силы всемирного тяготения определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{12} &= G \frac{m_1 m_2}{r^2} \cdot \left( \frac{\mathbf{r}}{r} \right)_{12} \\ \mathbf{F}_{21} &= G \frac{m_1 m_2}{r^2} \cdot \left( \frac{\mathbf{r}}{r} \right)_{21}, \end{aligned} \quad (87)$$

где  $\mathbf{F}_{12}$  — сила, с которой вторая материальная точка притягивает к себе первую;  $\left( \frac{\mathbf{r}}{r} \right)_{12}$  — *единичный вектор*, имеющий направление от первой материальной точки ко второй;  $\mathbf{F}_{21}$  — сила, с которой первая материальная точка притягивает к себе вторую;  $\left( \frac{\mathbf{r}}{r} \right)_{21}$  — *единичный вектор*, имеющий направление от второй материальной точки к первой.

Ньютон распространил закон всемирного тяготения на все тела Вселенной. Он показал, что однородный шар создает во внешнем пространстве такую же силу, как материальная точка с массой, равной массе шара, расположенная в центре последнего<sup>1</sup>. Этот закон называли "*величайшим обобщением, достигнутым человеческим разумом*".

Численное значение  $G$  было впервые определено Кавендишем в 1797—1798 гг., измерившим в лаборатории с помощью изобретенных им **крутильных весов** (рис. 54) силы притяжения между двумя шарами.

Идея Кавендиша состояла в том, чтобы подвесить на очень тонкой кварцевой (или металлической) нити легкое деревянное коромысло с двумя маленькими свинцовыми шарами с одинаковыми массами  $m = 729$  г и затем поднести к

<sup>1</sup> Это же верно для шара, состоящего из однородных шаровых слоев разной плотности.

ним сбоку два больших свинцовых шара с одинаковыми массами  $M = 158$  кг. Центры больших и малых шаров расположены в одной горизонтальной плоскости. Притяжение шаров слегка перекрутит нить, таким образом, силу притяжения между двумя шарами можно измерить. Кавендиш назвал свой опыт "взвешиванием Земли". При помощи такого прибора Кавендишу удалось непосредственно измерить силу, расстояние и величину обеих масс и, таким образом, определить постоянную тяготения  $G$ .

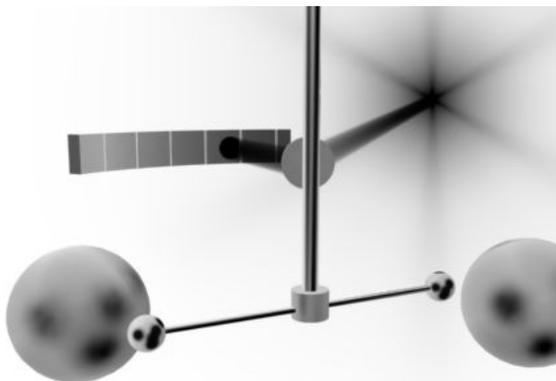


Рис. 54. Крутильные весы — схема опыта Кавендиша

Таким образом, от открытия закона всемирного тяготения Ньютоном до его прямого подтверждения Кавендишем прошло более ста лет. Среди десяти красивейших экспериментов за всю историю физики этот эксперимент занял шестое место<sup>2</sup>.

По современным данным:

$$G = 6,6720 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-2} \text{ или } (6,6745 \pm 0,0008) \cdot 10^{-8} \text{ см}^3 \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}.$$



Два шара с массой 1 кг каждый, центры которых отстоят друг от друга на 1 м, притягиваются взаимно с силой, равной  $6,6720 \cdot 10^{-11}$  Н.

Массу земного шара  $M$  можно определить, зная его размеры и величину ускорения свободного падения  $g$ , измеренную на земной поверхности. Сила

<sup>1</sup> Правильнее было бы назвать "измерением массы Земли".

<sup>2</sup> По результатам опроса американских физиков, проведенного сотрудником философского факультета Университета штата Нью-Йорк Робертом Кризом (Robert Crease) и историком Brookhaven National Laboratory Стони Бруком (Stony Brook).

тяжести, действующая на находящееся на земной поверхности тело, имеющее массу  $m$  :

$$F_T = mg, \quad (88)$$

в первом приближении (без учета вращения Земли) может быть приравнена к силе притяжения:

$$F = G \frac{Mm}{R_3^2}, \quad (89)$$

где  $G$  — гравитационная постоянная;  $M$  — масса земного шара;  $R_3$  — радиус Земли ( $6,38 \cdot 10^6$  м).

Зная  $G$ ,  $m$ ,  $g$  и  $R_3$ , можно вычислить  $M$  :

$$M = \frac{gR_3^2}{G} \approx 5,98 \cdot 10^{24} \text{ кг}. \quad (90)$$




---

Сила притяжения объекта пропорциональна коэффициенту инерции, или, другими словами, массе.

---

В ньютоновской теории справедлив **принцип суперпозиции**: сила тяготения, действующая на некоторую точку со стороны многих материальных точек, является векторной суммой сил от каждой из них.

Ньютоновская теория тяготения и ньютоновская механика явились величайшим достижением естествознания. Они позволяют описать с большой точностью обширный круг явлений, в том числе движение естественных и искусственных тел в Солнечной системе, движения в других системах небесных тел: в двойных звездах, в звездных скоплениях, в галактиках. На основе теории тяготения Ньютона было предсказано существование планеты Нептун (см. разд. 4.2) и спутника Сириуса, а также сделаны многие другие предсказания, впоследствии блестяще подтвердившиеся. В современной астрономии закон тяготения Ньютона является фундаментом, на основе которого вычисляются движения и строение небесных тел, их массы, эволюция. Закон всемирного тяготения позволяет определить массы Земли, Солнца, Луны и планет (законы Кеплера — см. разд. 4.1). Точное определение гравитационного поля Земли позволяет установить распределение масс под ее поверхностью (гравиметрическая разведка — см. разд. 5.10).

Однако в некоторых случаях, когда поля тяготения становятся достаточно сильными, а скорости движения тел в этих полях соизмеримы со скоростью света, тяготение уже не может быть описано законом тяготения Ньютона.

Теория Ньютона предполагает мгновенное распространение тяготения и уже поэтому не может быть согласована со *специальной теорией относительности* (см. разд. 10.1), утверждающей, что никакое взаимодействие не может распространяться со скоростью, превышающей скорость света в вакууме.

Так как теория Ньютона не согласуется со специальной теорией относительности, то ее нельзя использовать в тех случаях, когда гравитационные поля настолько сильны, что разгоняют движущиеся в них тела до скорости порядка скорости света.

Кроме того, ньютоновская теория неприменима и к расчету движения частиц даже в слабом поле тяготения, если частицы, пролетающие вблизи массивных тел, уже вдали от этих тел имели скорость, сравнимую со скоростью света.



**Тяготение (гравитация)** — универсальное взаимодействие между любыми видами материи.

---

Если это взаимодействие относительно слабое, и тела движутся с нерелятивистскими скоростями, то тяготение описывается теорией Ньютона. В случае сильных быстропеременных полей и быстрых движений тел тяготение описывается общей теорией относительности (ОТО), созданной Эйнштейном. Тяготение является самым слабым из 4 типов фундаментальных взаимодействий и в квантовой физике описывается квантовой теорией гравитации, которая еще далека от завершения.

#### Контрольные вопросы

- ? Сформулируйте закон всемирного тяготения.
- ? Какой вид имеет формула закона всемирного тяготения для материальных точек?
- ? Что называется гравитационной постоянной и как она была впервые определена?
- ? Что называют гравитационным полем?
- ? Зависит ли сила тяготения от свойств среды, в которой находятся тела?

## 4.4. Гравитационная и инертная массы, их эквивалентность

**Гравитационная масса (тяжелая масса, тяготеющая масса)** — физическая величина, характеризующая свойства тела как источника поля тяготения или тела, испытывающего действие такого поля.

Самой важной особенностью поля тяготения, известной в ньютоновской теории и положенной Эйнштейном в основу ОТО, является то, что тяготение совершенно одинаково действует на разные тела, сообщая им одинаковые ускорения независимо от их массы, химического состава и других свойств.

Этот факт был установлен опытным путем еще Галилеем и может быть сформулирован как **принцип строгой пропорциональности гравитационной массы**, определяющей взаимодействие тела с полем тяготения, и **инертной массы**, определяющей сопротивление тела действующей на него силе и входящей во *второй закон механики Ньютона* (69).

Рассмотрим в *гелиоцентрической системе отсчета* (см. разд. 3.1) свободное падение тел. Всякое тело вблизи поверхности Земли испытывает силу притяжения к Земле, которая равна (86):

$$F = G \frac{m_{ГП} M_{ГП}}{R_3^2}, \quad (91)$$

где  $G$  — гравитационная постоянная;  $m_{ГП}$  — гравитационная масса тела;  $M_{ГП}$  — гравитационная масса Земли;  $R_3$  — радиус земного шара.

Под действием этой силы тело приобретает ускорение  $a$ , которое должно быть равно силе  $F$ , деленной на *инертную массу*<sup>1</sup> тела:

$$a = \frac{F}{m} = G \frac{M_{ГП}}{R_3^2} \frac{m_{ГП}}{m}. \quad (92)$$

Опыт показывает, что ускорение  $a$  не зависит от типа действующей силы и тела. Множитель  $G \frac{M_{ГП}}{R_3^2}$  также одинаков для всех тел. Следовательно, и от-

ношение  $\frac{m_{ГП}}{m}$  оказывается для всех тел одним и тем же.



Инертная и гравитационная массы всех тел строго пропорциональны друг другу<sup>2</sup>. Инерциальное поле, создаваемое ускорением в малой области пространства, полностью эквивалентно гравитационному ( $m = m_{ГП}$ ).

<sup>1</sup> Инертная масса — масса тела, рассматриваемая с точки зрения его сопротивлению ускорению. Определяется силой, требующейся для придания телу данного ускорения.

<sup>2</sup> Следует подчеркнуть, что речь идет не о двух разных массах, а об одной и той же физической величине — массе, определяющей различные явления.

Нетривиальность данного соотношения заключается в том, что входящие в него величины имеют принципиально разную физическую природу. Но, несмотря на столь существенное физическое различие, даже в очень тонких современных опытах не обнаружено отличия отношения  $\frac{m_{GP}}{m}$  от единицы в поле Земли с точностью порядка  $10^{-8}$  и в поле Солнца с точностью порядка  $10^{-12}$ .

Неразличимость динамических эффектов ускорения и тяготения Эйнштейн называл **принципом эквивалентности**. Из него следует, что ускоренное движение не имеет абсолютного критерия. *Силы инерции*, вызываемые ускорением, нельзя отличить от гравитационных сил. Они полностью тождественны, поэтому все виды движения, в том числе и ускоренное, относительны. Силовое поле, возникающее в малой области пространства, когда телу сообщается ускорение, можно рассматривать и как инерционное, и как гравитационное, в зависимости от выбора системы отсчета.

Покажем это на примере.

Представим себе в космосе лифт, движущийся вверх с постоянно нарастающей скоростью. Если ускорение постоянно и в точности равно ускорению падающего на Землю предмета, то человек внутри лифта будет чувствовать себя так же, как и в гравитационном поле, поскольку внутри будут действовать силы инерции. Но теоретически лифт можно рассматривать как неподвижную, фиксированную точку отсчета. Тогда вся Вселенная со всеми ее галактиками окажется движущейся вниз мимо лифта с нарастающей скоростью. Это ускоренное движение Вселенной создает гравитационное поле, которое заставляет все предметы в лифте прижиматься к полу.

Но что же происходит в действительности? Это неправильный вопрос. Нет никакого действительного, абсолютного движения. Существует лишь относительное движение лифта и Вселенной. Это относительное движение создаст силовое поле, которое может называться гравитационным или инерционным в зависимости от выбора системы отсчета. □



---

Масса — фундаментальная физическая величина, определяющая инерционные и гравитационные свойства тел — от макроскопических объектов до атомов и элементарных частиц — в нерелятивистском приближении, когда их скорости пренебрежимо малы по сравнению со скоростью света.

-----

## 4.5. Черные дыры

Одним из самых интересных проявлений гравитационных сил являются **черные дыры** или **коллапсары** — тела бесконечно большой плотности. Интенсивность гравитационного взаимодействия тел определяется их *массой*, все же другие известные виды взаимодействия от массы не зависят (см. разд. 3.5).

**Гравитационный коллапс** — катастрофически быстрое сжатие массивных тел под действием гравитационных сил. Гравитационным коллапсом может заканчиваться эволюция звезд с массой свыше двух-пяти солнечных масс. После исчерпания в таких звездах ядерного горючего они теряют свою механическую устойчивость и начинают с увеличивающейся скоростью сжиматься к центру. Если растущее внутреннее давление останавливает гравитационный коллапс, то центральная область звезды становится сверхплотной нейтронной звездой, что может сопровождаться сбросом оболочки и наблюдаться как вспышка сверхновой звезды. Однако если радиус звезды уменьшился до значения гравитационного радиуса, то никакие силы не могут воспрепятствовать ее дальнейшему сжатию и превращению в коллапсар.




---

Если количество частиц вещества в некоторой области пространства превысит определенное критическое значение, то гравитационные силы будут преобладать над всеми другими, а вследствие того, что гравитационные силы являются всегда силами притяжения, данное тело будет сжиматься.

---

Поскольку пространство-время в ОТО предполагается непрерывным, то этому сжатию нельзя положить никакого обоснованного предела. В итоге, согласно данной теории получается, что такое тело должно сжаться в точку, при этом интенсивность гравитационных полей вблизи него возрастает до бесконечности, а скорость, необходимая для того, чтобы покинуть пределы этого скопления, должна будет быть больше скорости света, следовательно, ни одна частица вещества не сможет уже этого сделать, т. е. образуется объект, способный поглощать в себя любое количество любой материи и ничего не выпускать обратно.

**Черная дыра** — космический объект, возникающий в результате сжатия тела (сверхмассивной звезды) гравитационными силами до размеров, меньших его гравитационного радиуса  $r_g$ :

$$r_g = \frac{2GM}{c^2}, \quad (93)$$

где  $G$  — гравитационная постоянная;  $M$  — масса тела;  $c$  — численное значение скорости света.

**Гравитационный радиус** — радиус сферы, на которой сила тяготения, создаваемая массой, лежащей внутри этой сферы, стремится к бесконечности. Гравитационные радиусы обычных небесных тел ничтожно малы, например, для Солнца  $r_g \approx 3$  км, для Земли  $r_g \approx 0,9$  см. Если тело сожмется до размеров, меньших его гравитационного радиуса, то никакое излучение или частицы не смогут преодолеть поле тяготения и выйти из-под сферы радиуса  $r_g$  к удаленному наблюдателю.

После того как открыли нейтроны, стала понятна конечная судьба тяжелых звезд — огромное тяготение "вдавливает" свободные электроны в протоны, и возникают электрически нейтральные частицы — нейтроны. Родается нейтронная звезда, вещество которой имеет огромную плотность.

Если средних размеров земную гору сжать до плотности черной дыры, получится частица, сравнимая по размерам с протоном. Кусочек такой материи размером с кусочек сахара весит около миллиарда тонн. □



Любое тело, упавшее на поверхность черной дыры, будет поглощено безвозвратно.

-----

Первым возможность существования черных дыр предсказал французский физик Пьер Симон Лаплас (Pierre Simon marquis de Laplace, 1749—1827 гг.), который, изучая ньютоновскую теорию тяготения, пришел к выводу, что скорость, необходимая для того, чтобы преодолеть гравитационное поле определенного объекта, у особо массивных небесных тел должна превышать скорость света. Исходя из этого, Лаплас заключил, что такие тела должны быть невидимыми.

Долгие годы версия Лапласа считалась неправдоподобной, и лишь после того, как Эйнштейн в начале XX в. создал теорию относительности и доказал квантовую природу света, астрофизики всерьез заинтересовались этим предположением: математическое обоснование теории черных дыр в 1916 г. предложил немецкий астроном Карл Шварцшильд (Schwarzschild, 1873—1916 гг.). Существование черных дыр было обосновано американским физиком Робертом Оппенгеймером (Robert Oppenheimer, 1904—1967 гг.) и Г. Волковым в 1939 г. на основе общей теории относительности.

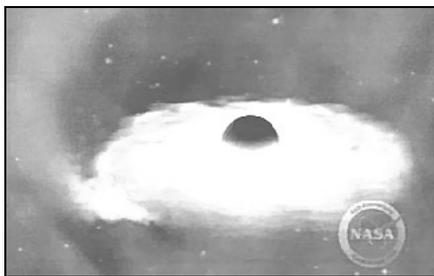
Согласно классическим постулатам, черные дыры — это последний этап эволюции звезд большой массы. Термин "черные дыры" был предложен в 1967 г. американским исследователем Джоном Уилером. Примерно тогда же у аст-

рофизиков появились и первые косвенные свидетельства реального существования этих неуловимых объектов во Вселенной.

Все черные дыры притягивают газ из окружающего пространства, и вначале он собирается в диск возле черной дыры. От столкновений частиц газ разогревается, теряет энергию, скорость и начинает по спирали приближаться к черной дыре. Газ, нагретый до нескольких миллионов градусов, образует вихрь, имеющий форму воронки. Его частицы мчатся со скоростью  $100\,000\text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$ . В конце концов, вихрь газа доходит до "горизонта событий" и навечно исчезает в черной дыре. Поскольку же минимальная скорость, необходимая для того, чтобы уйти от этой "дыры", будет меньше скорости света, то любой предмет, не упавший непосредственно на ее поверхность, будет иметь шанс покинуть ее окрестности. При падении вещества на поверхность черной дыры должно возникать рентгеновское излучение вследствие большой интенсивности гравитационных полей<sup>1</sup>.

В 1997 г. удалось доказать, что некоторые черные дыры вращаются, вовлекая в это движение и окружающее их пространство. Кроме того, были обнаружены колебания интенсивности рентгеновского излучения. Эти наблюдения навели в конце 1997 г. на след еще более удивительного феномена: газовые и пылевые частицы около некоторых черных дыр подвержены периодическому движению, называемому *прецессией*. Это значит, что ось вихревого движения частиц не стоит на месте, а вращается вокруг другой оси.

В настоящее время имеются сообщения об образовании 20 черных дыр, которые по своей массе в несколько раз превышают массу Солнца<sup>2</sup> (см. разд. 4.2) (рис. 55).



**Рис. 55.** Массивная черная дыра растягивается, касается звезды и медленно поглощает ее часть. Фото NASA

<sup>1</sup> Диск черной дыры "светится" из-за ударного взаимодействия разогнанных гравитацией частиц. Диск обладает большой температурой. Если черная дыра мала по размерам, то ее поверхность испаряется, и малая черная дыра исчезает.

<sup>2</sup> По данным Конференции Американской астрономической ассоциации, проходившей в 2000 г.

В 2002 г. американский орбитальный телескоп Hubble по косвенным признакам обнаружил черную дыру, находящуюся в нашей Галактике, в созвездии Скорпиона на расстоянии от Земли в 6000 световых лет.

В начале 2005 г. впервые в истории американскому астроному Уоррену Брауну (Brawn) удалось обнаружить звезду в центральной области нашей Галактики, улетающую в межгалактическое пространство под действием черной дыры в центре Млечного Пути. Расстояние между бинарной звездной системой, в которую входила эта звезда, и черной дырой на момент катаклизма примерно в 50 раз превышало расстояние между Землей и Солнцем. Под воздействием гравитационного поля черной дыры звезда смогла набрать скорость примерно в 2 раза больше скорости, необходимой для того, чтобы преодолеть притяжение всей Галактики. На данный момент звезда находится на расстоянии примерно 180 000 световых лет от Земли во внешнем районе Млечного Пути, называемом Галло.



## ГЛАВА 5

# Гравитационное поле Земли. Гравиметрия

### 5.1. Гравитационное поле Земли

Наличие *всемирного тяготения* приводит к представлению о **гравитационном поле** (как особой формы материи), в пределах которого на каждое тело действует *сила*, прямо пропорциональная *массе* этого тела.

Гравитационное поле представляет собой разновидность **силового поля**: на частицы, помещенные в каждой точке такого поля, действуют силы, прямо пропорциональные определенному физическому свойству этих частиц — массе.

Земля также окружена гравитационным полем (или **полем тяготения**), в котором на тело действуют силы, пропорциональные их массам.

Для характеристики величины и направления силового поля тяготения в конкретной точке поля вводят векторную величину, называемую **напряженностью** и определяемую отношением силы, испытываемой массой, помещенной в данную точку поля, к этой массе.

В каждой точке поля Земли можно определить отношение силы, действующей на точечное тело, к массе этого тела; это отношение не зависит от вещества тела и равно ускорению, сообщаемому силой тяготения в данной точке поля:

$$\frac{F}{m} = g, \quad (94)$$

$$|\mathbf{g}| = G \frac{M}{r^2}. \quad (95)$$

где  $G$  — гравитационная постоянная;  $M$  — масса Земли;  $r$  — расстояние до массы  $m$ .

Следовательно, векторное отношение силы, действующей на точечное тело, к массе этого тела можно рассматривать как **напряженность поля земного тяготения**  $\Gamma$ .

В поле, созданном телом массы  $M$ , напряженность поля тяготения зависит только от координат рассматриваемой точки поля. Поэтому напряженность называют "функцией точки".

В любом силовом поле можно провести линию, касательная к которой в каждой точке совпадает с вектором напряженности в данной точке, — **линию напряженности**<sup>1</sup>. По определению направление линий напряженности считается совпадающим с направлением вектора напряженности. Например, **линии напряженности поля тяготения**, связанного с *материальной точкой*, начинаются в бесконечности и кончаются в этой точке. Можно условиться проводить через каждый элемент поверхности, нормальной к вектору напряженности, число линий, пропорциональное значению последней. В результате получается удобный графический способ представления поля: оно тем сильнее, чем гуще располагаются линии напряженности.

Введем **поток вектора через поверхность** — интегральную характеристику векторного поля, равную сумме произведений площадей элементарных участков, на которые разбита поверхность, на нормальные составляющие вектора к этим участкам.

Поток вектора напряженности поля тяготения через поверхность конечных размеров  $\Phi_{\Gamma} = \oint_S \Gamma dS$  определяет число линий напряженности, пронизывающих последнюю.

Свойства потока сформулированы в одной из важнейших теорем теории поля (она была установлена русским математиком и механиком Михаилом Васильевичем Остроградским (1801—1861/62 гг.) в 1828 г. (опубликована в 1831 г.) и английским математиком Джорджем Грином (G. Green, 1793—1841 гг.) (опубликована в 1845 г.) в виде некоторой общей математической теоремы, и Гауссом в 1830 г. для чисто электростатических полей) — в **теореме Остроградского—Гаусса** (более подробно теорему Остроградского—Гаусса мы рассмотрим в *томе "Электричество" данного курса*).

Если в поле, связанном со многими телами массами  $m_k$ , выделить произвольную замкнутую поверхность  $S$ , то поток вектора напряженности через эту

<sup>1</sup> Физический смысл имеет только **семейство** (совокупность) линий напряженности, но не отдельная линия. Понятие о семействе линий введено английским физиком Майклом Фарадеем (Michael Faraday, 1792—1867).

поверхность равен:  $\Phi_{\Gamma} = \oint_S \Gamma dS = -4\pi G \sum_k m_k$ , где в сумму входят только массы точек, расположенных внутри поверхности<sup>1</sup>.

Теорема Остроградского—Гаусса позволяет находить напряженность поля при симметричном расположении материальных тел. Так, однородный шар создает во внешнем пространстве такое же поле, как *материальная точка*, помещенная в центре шара (это легко получить, исходя из симметрии распределения поля).

При удалении от поверхности Земли сила земного тяготения изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния  $r$  до центра Земли. На рис. 56 показано, как изменение силы тяготения действует на космонавта в космическом корабле при его удалении от Земли (сила, с которой космонавт притягивается к Земле вблизи ее поверхности, принята равной 700 Н).

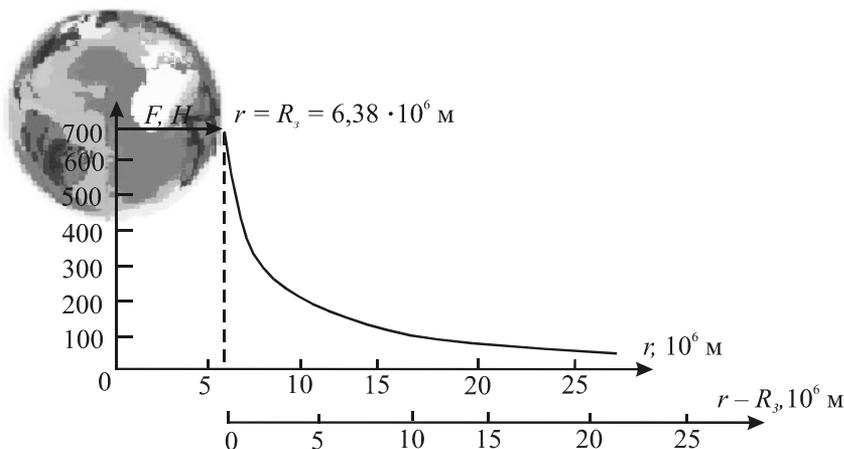


Рис. 56. Изменение силы тяготения, действующей на космонавта при удалении от Земли

Примером системы двух взаимодействующих тел может служить система Земля—Луна. Луна находится от Земли на расстоянии  $r_{Л} = 3,84 \cdot 10^6 \text{ м}$ . Это расстояние приблизительно в 60 раз превышает радиус Земли  $R_3$ . Следовательно, ускорение  $a_{Л}$ , обусловленное земным притяжением, на орбите Луны равно:

$$a_{Л} = g \left( \frac{R_3}{r_{Л}} \right) = 9,81 \cdot \frac{1}{60^2} \approx 0,0027 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}. \quad (96)$$

<sup>1</sup> Иногда эту формулу называют "теоремой Гаусса", чтобы отличить этот физический закон от широко известной математической теоремы Остроградского—Гаусса.

С таким ускорением, направленным к центру Земли, Луна движется по орбите. Следовательно, это ускорение является *нормальным ускорением*, которое можно рассчитать по кинематической формуле для нормального ускорения:

$$a_{\text{Л}} = \frac{v^2}{r_{\text{Л}}} = \frac{4\pi r_{\text{Л}}}{T^2} \approx 0,0027 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}, \quad (97)$$

где  $T$  — период обращения Луны вокруг Земли (27,3 сут.). Совпадение результатов расчетов, выполненных разными способами, подтверждает предположение Ньютона о единой природе силы, удерживающей Луну на орбите, и силы тяготения.

### Контрольные вопросы

- ? Что называют гравитационным полем?
- ? Что называют напряженностью поля тяготения?

## 5.2. Сила тяжести

Одним из проявлений силы взаимного тяготения является **сила тяжести**, т. е. сила притяжения тел к Земле.

Если на тело действует только сила тяжести, то оно совершает свободное падение.

**Свободное падение** — это поступательное движение тела в безвоздушном пространстве (вакууме) только под действием силы тяжести.

Свободное падение — прямолинейное равноускоренное движение, т. к. вблизи поверхности Земли оно происходит под действием постоянной по величине и направлению силы тяжести (считаем, что скорость падения не настолько велика, чтобы *сопротивление воздуха* (см. разд. 6.8) могло оказать заметное влияние, а изменение расстояния до центра Земли можно не учитывать).

Если сила притяжения в точности пропорциональна массе, то два тела с разной массой должны одинаково изменять свою скорость в поле тяготения. Иначе говоря, два различных предмета в вакууме, независимо от их массы, за одинаковое время пролетят по направлению к Земле одинаковые расстояния. Аристотель же утверждал, что тяжелые тела падают быстрее легких. Галилей с помощью остроумных рассуждений опроверг его и пришел к выводу: в пустом пространстве (когда нет сопротивления воздуха) все тела должны падать одинаково быстро. Опыты с ядрами, сброшенными с "Падающей башни" в Пизе (рис. 57) в конце XVI в., подтвердили с доступной для того времени точностью, что в отсутствие сопротивления воздуха все тела падают на Землю равноускоренно, и что в данной точке Земли ускорение всех тел при падении одно и то же. Осуществлял ли опыты непосредственно сам Галилей точно неизвестно. В своей книге он говорил о том, что два шарика с массами,

различающимися в несколько раз (например, из дуба и свинца), достигают земли с незначительной разницей в скорости.

Среди десяти красивейших экспериментов за всю историю физики этот эксперимент занял второе место<sup>1</sup>.

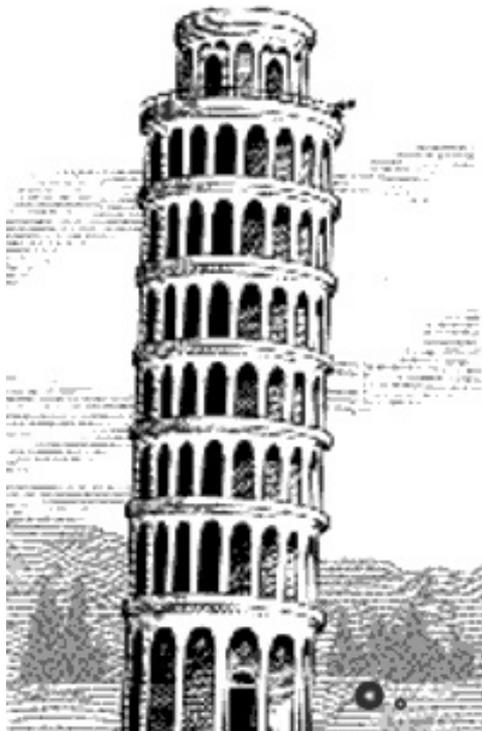


Рис. 57. опыты Галилея с падающими телами

Одинаковость ускорений свободного падения для всех тел<sup>2</sup> означает, например, что какая-нибудь вещь внутри искусственного спутника Земли будет двигаться точно по такой же орбите, как сам спутник, т. е. будет парить внутри него. И все это — следствие того факта, что сила пропорциональна массе, а ускорение обратно пропорционально массе.

На опыте верность этого утверждения проверил венгерский физик Лоранд (Роланд) фон Этвеш (Eötvös, 1848—1919 гг.) в 1909 г., а впоследствии более

<sup>1</sup> По результатам опроса американских физиков, проведенного сотрудником философского факультета Университета штата Нью-Йорк Робертом Кризом (Robert Crease) и историком Brookhaven National Laboratory Стони Брук (Stony Brook).

<sup>2</sup> Иногда это утверждение называют **обобщенным законом Галилея**.

тщательно — Дикке. Земля вращается вокруг Солнца, поэтому инерция отбрасывает земные тела от Солнца тем сильнее, чем больше инерция. Но, согласно закону тяготения, тела притягиваются к Солнцу — и тем сильнее, чем больше их масса. Поэтому если они притягиваются к Солнцу не в той же пропорции, в какой отбрасываются инерцией, то один предмет будет, например, стремиться к Солнцу, а другой — прочь от него. И тогда, прикрепив эти два предмета к крутильным весам Кавендиша, мы должны увидеть, что одно повернется по направлению к Солнцу и перекрутит кварцевую нить (сначала опыт был проделан над сандаловым деревом, потом экспериментировали с медью и свинцом, а теперь пробуют на полиэтилене). Однако нить не перекручивается, и, с той точностью, которую дает этот опыт, можно утверждать, что притяжение двух предметов строго пропорционально центробежному эффекту, который обусловлен инерцией.

Вектор ускорения свободного падения обозначается символом  $g$ , он направлен вниз. Очевидно, что ускорение свободного падения совпадает с *напряженностью поля силы тяжести*. Ускорение свободного падения измеряют в единицах ускорения, принятых в данной системе единиц (например, в СИ —  $\text{м}\cdot\text{с}^{-2}$ ), однако в геофизике применяются и специальные **гравитационные единицы** (ге), равные  $1 \text{ км}\cdot\text{с}^{-2}$ . На XV ассамблее Международного союза геодезии и геофизики в Москве в 1971 г. для измерения напряженности силы тяжести (численно совпадающей с  $g$ ) предложено использовать **галилео**<sup>1</sup> или гал (Гал) {galileo, gal (Gal)} ( $1 \text{ Гал} = 10^{-2} \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$ ,  $1 \text{ мГал} = 10^{-8} \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$ ).

Ускорение свободного падения на уровне поверхности Земли на данной географической широте (зависимость ускорения свободного падения от широты см. в разд. 7.4) для всех тел одинаково и равно: на полюсе  $g = 9,83216 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$ , на экваторе  $g = 9,78030 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$ , на широте Москвы  $g = 9,81523 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$ , на широте Санкт-Петербурга  $g = 9,81908 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$  (см. табл. 19).

Ускорение свободного падения зависит от высоты — при подъеме на 1 м изменение  $g$  составляет примерно 0,3 мГал.

Зависимость между кинематическими характеристиками свободного падения получают из формул для равноускоренного движения (см. разд. 2.9), если в этих формулах положить  $a = g$ . При  $v_0 = 0$ :

$$v = gt, \quad (98)$$

$$H = \frac{gt^2}{2}, \quad (99)$$

<sup>1</sup> Названа в честь Галилея.

$$t = \sqrt{\frac{2H}{g}}, \quad (100)$$

где  $H$  — высота,  $t$  — время падения.

Скорость тела в любой точке:

$$v = \sqrt{2g(H - y)}, \quad (101)$$

где  $y$  — высота точки. В частности, при  $y = 0$  скорость  $v$  падения тела на Землю:

$$v = \sqrt{2gH}. \quad (102)$$

Аналогичным образом решается задача о движении тела, брошенного вертикально вверх с некоторой начальной скоростью  $v_0$ . Если ось  $OY$  направлена вертикально вверх, а ее начало совмещено с точкой бросания, то в формулах равноускоренного прямолинейного движения следует положить:  $y_0 = 0$ ,  $v_0 > 0$ ,  $a = -g$ . Отсюда:

$$v = v_0 - gt. \quad (103)$$

Через время  $\frac{v_0}{g}$  скорость тела  $v$  становится равной нулю, т. е. тело достигает высшей точки подъема. Зависимость координаты  $y$  от времени  $t$  выражается формулой:

$$y(t) = v_0 t - \frac{gt^2}{2}. \quad (104)$$




---

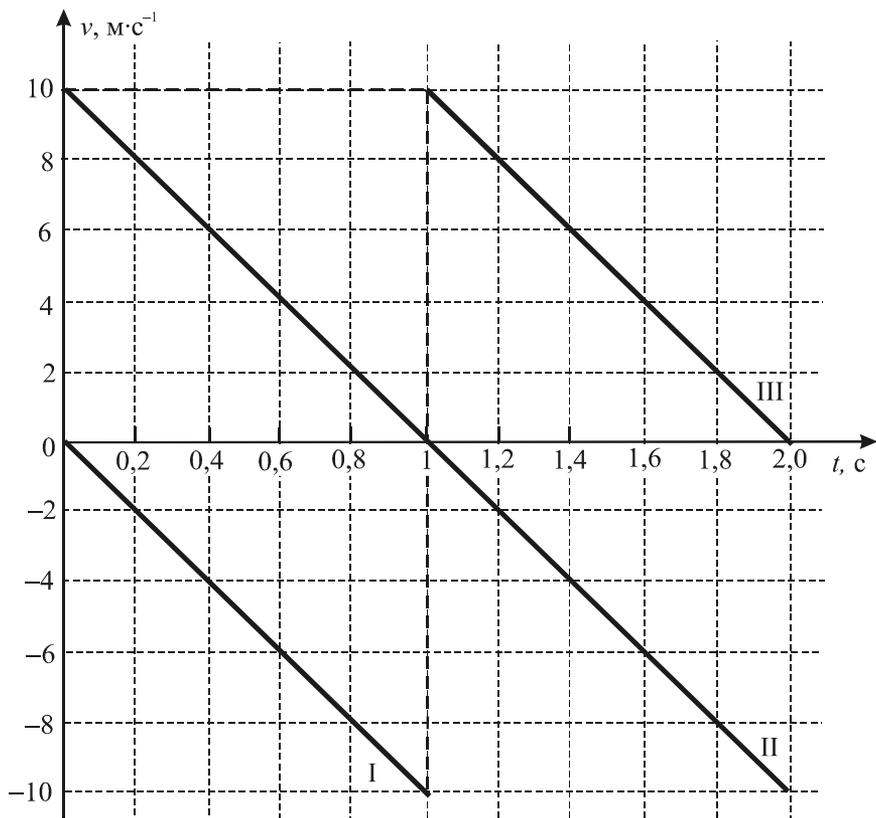
Тело, вертикально брошенное вверх с уровня Земли ( $y = 0$ ) со скоростью  $v_0$ , возвращается на Землю ( $y = 0$ ) через время  $\frac{2v_0}{g}$  (время подъема и время падения одинаковы). Во время падения на Землю скорость тела равна  $-v_0$ , т. е. тело падает на Землю с такой же по модулю скоростью, с какой оно было брошено вверх.

---

Максимальная высота подъема:

$$H = y_{\max} = \frac{v_0^2}{2g}. \quad (105)$$

На рис. 58 представлены графики скоростей для разных случаев движения тела с ускорением  $a = 10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$  (округленное значение ускорения свободного падения).



**Рис. 58.** Графики скоростей для различных режимов движения тела с ускорением  $a = -10 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$

График I соответствует падению тела без начальной скорости с высоты 5 м. Падение происходит в течение времени  $t = 1 \text{ с}$ . График II — движение тела, брошенного вертикально вверх с начальной скоростью  $v_0 = 10 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ . Через 1 с тело достигает максимальной высоты подъема  $H=5 \text{ м}$  и падает вниз. График III — продолжение графика I (свободно падающее тело при ударе о поверхность отскакивает и его скорость изменяет знак на противоположный).

Воздух всегда оказывает сопротивление движению падающего тела, причем для данного тела сопротивление воздуха тем больше, чем больше скорость падения (см. разд. 6.9). Следовательно, по мере увеличения скорости падения сопротивление воздуха увеличивается, ускорение тела уменьшается и, когда сопротивление воздуха сделается равным силе тяжести, ускорение свободно падающего тела станет равным нулю. В результате движение тела будет равномерным движением. Так, например, парашютист в затяжном прыжке (т. е. без раскрытия парашюта) сначала падает ускоренно, при этом сопротивление

воздуха падению растет с увеличением скорости падения и в некоторый момент времени после раскрытия парашюта становится равным силе тяжести парашютиста. С этого момента падение парашютиста становится равномерным (см. разд. 6.9).

Задача о свободном падении тел тесно связана с задачей о движении тела, брошенного под некоторым углом к горизонту. Для кинематического описания движения тела удобно одну из осей системы координат направить вертикально вверх (ось  $OY$ ), а другую (ось  $OX$ ) — расположить горизонтально. Тогда движение тела по криволинейной траектории можно представить как сумму двух движений, протекающих независимо друг от друга — движения с ускорением свободного падения вдоль оси  $OY$  и равномерного прямолинейного движения вдоль оси  $OX$ . На рис. 59 изображен вектор начальной скорости тела и его проекции на координатные оси.

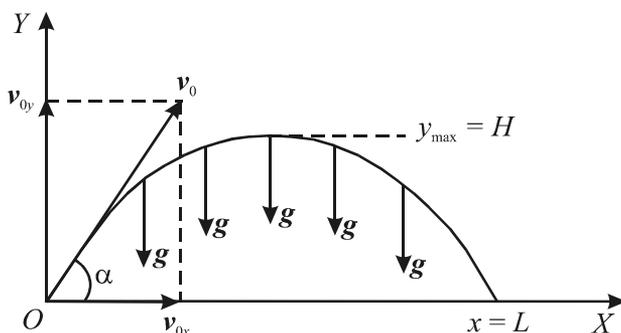


Рис. 59. Движение тела, брошенного под углом  $\alpha$  к горизонту, разложение вектора начальной скорости тела  $v_0$  по координатным осям

Таким образом, для движения вдоль оси  $OX$ :

$$x_0 = 0, v_{0x} = v_0 \cos \alpha, a_x = 0, \quad (106)$$

а для движения вдоль оси  $OY$ :

$$y_0 = 0, v_{0y} = v_0 \sin \alpha, a_y = -g. \quad (107)$$

В результате время полета:

$$t = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}, \quad (108)$$

дальность полета:

$$L = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}, L_{\max} = \frac{v_0^2}{g} \text{ (при } \alpha = 45^\circ \text{)}, \quad (109)$$

максимальная высота подъема:

$$H_{\max} = \frac{v_0 \sin^2 \alpha}{2g}. \quad (110)$$

**Баллистическая траектория** — траектория движения свободно брошенного тела под действием только силы тяжести.



Движение тела, брошенного под углом к горизонту, происходит по параболе. В реальных условиях такое движение в значительной степени искажено из-за сопротивления воздуха, которое может существенно уменьшить дальность полета тела.

Собственное гравитационное поле Луны определяет ускорение свободного падения  $g_L$  на ее поверхности. Масса Луны в 81 раз меньше массы Земли, а ее радиус приблизительно в 3,7 раза меньше радиуса Земли. Поэтому ускорение  $g_L$  определится выражением:

$$g_L = G \frac{M_L^2}{R_L^2} = G \frac{M_3}{T_3^2} \frac{3,7^2}{81} \approx 0,17g \approx 1,66 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}. \quad (111)$$

В условиях такой слабой гравитации оказались астронавты, высадившиеся на Луне. Человек в таких условиях может совершать гигантские прыжки — если человек в земных условиях подпрыгивает на высоту 0,5 м, то на Луне он мог бы подпрыгнуть на высоту около 3 м.

### Контрольные вопросы

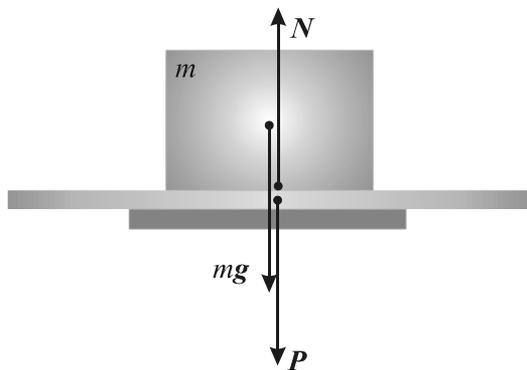
- ? Что называют силой тяжести? По какой формуле определяют модуль силы тяжести?
- ? Что называют свободным падением тел?
- ? При каких условиях падение тел можно считать свободным?
- ? Каким видом движения является свободное падение тел?
- ? Зависит ли ускорение свободного падения тела от его массы?
- ? Докажите, что ускорение свободного падения в данной точке околоземного пространства одинаково для всех тел.
- ? Как изменяется сила тяжести при удалении тела от поверхности Земли?
- ? Куда приложена и как направлена сила тяжести, действующая на любое тело?
- ? Результатом каких двух независимых движений является движение тела, брошенного под углом к горизонту?
- ? Почему ускорение свободного падения на Луне меньше, чем на Земле?

## 5.3. Вес

Что такое в нас тяжесть? Разве тело наше тянет? Тело наше, милый человек, на весу ничего не значит: сила наша, сила тянет, не тело!

*Н. С. Лесков<sup>1</sup>*

**Вес тела** — сила, с которой тело действует на горизонтальную подставку или на вертикальный подвес вследствие гравитационного притяжения к Земле. При этом предполагается, что тело неподвижно относительно опоры или подвеса. Пусть тело лежит на неподвижном относительно Земли горизонтальном столе (рис. 60). Это определение относится к системе отсчета, связанной с подставкой или подвесом. Оно соответствует практике определения веса в земных условиях на пружинных весах.



**Рис. 60.** Вес тела и сила тяжести.  $mg$  — сила тяжести,  $N$  — сила реакции опоры,  $P$  — сила давления тела на опору (вес тела).  $mg = -N = P$

На тело действуют сила тяжести  $F_T = mg$ , направленная вертикально вниз, и сила  $F_Y = N$ , с которой опора действует на тело. Силу  $N$  называют **силой нормального давления** или **силой реакции опоры**. Силы, действующие на тело, уравновешивают друг друга:  $F_T = F_Y = -N$ . В соответствии с *третьим законом Ньютона* тело действует на опору с некоторой силой  $P$ , равной по модулю силе реакции опоры и направленной в противоположную сторону:  $P = -N$ . Силу  $P$  называют **весом** тела.

Если тело неподвижно висит на **пружинных весах** (безмене), то роль силы реакции опоры (подвеса) играет упругая сила пружины. По растяжению пружины можно определить вес тела и равную ему силу притяжения тела

<sup>1</sup> Лесков Николай Семенович (1831—1895 гг.) — русский писатель.

Землей. Для определения веса тела можно использовать также и **рычажные весы**, сравнивая вес данного тела с весом гирь на равноплечем рычаге. Уравновесив рычажные весы путем уравнивания веса тела суммарным весом гирь, мы одновременно достигаем равенства массы тела суммарной массе гирь, независимо от значения ускорения свободного падения в данной точке земной поверхности. Например, при подъеме в горы на высоту 1 км показания пружинных весов изменяются на 0,0003 от своего значения на уровне моря. При этом равновесие рычажных весов сохраняется. Поэтому рычажные весы являются прибором для определения массы тела путем сравнения с массой гирь (*эталонов*).

Если взвешивается тело, движущееся горизонтально относительно поверхности Земли, и его движение прямолинейно и равномерно, например, в вагоне поезда, то результат будет тот же, что и при взвешивании на земной поверхности.




---

Во всех инерциальных системах отсчета вес тела один и тот же, и в случае вакуума численно равен силе тяжести. Точнее, по *третьему закону Ньютона* (см. разд. 3.9), вес в отсутствие выталкивающей силы равен по величине и противоположен по направлению силе нормальной реакции горизонтальной подставки (или силе натяжения вертикального подвеса).

---

В свою очередь, согласно *второму закону Ньютона* (см. разд. 3.6), эта сила равна по величине и противоположна по направлению силе тяжести, т. к. под действием этих сил тело покоится или движется прямолинейно и равномерно. Таким образом, вес тела по величине действительно совпадает с силой тяжести в инерциальных системах отсчета.

Однако эти две силы нельзя отождествлять, т. к. вес тела — это сила, приложенная к подставке или подвесу со стороны тела, тогда как сила тяжести приложена к телу со стороны Земли. В *неинерциальных системах отсчета* (см. разд. 7.1) вес тела отличен от силы тяжести по величине.

Очевидно, имеет смысл различать:

- силу притяжения тел к Земле по закону всемирного тяготения. Эта **сила тяготения** не зависит от вращения Земли и от того, покоится или движется данное тело в поле тяготения Земли;
- **силу тяжести** — разность между силой тяготения и *центробежной силой инерции* (см. разд. 7.3). Наблюдаемое на Земле ускорение свободного падения сообщается телам силой тяжести. Лишь пренебрегая центробежной силой инерции по сравнению с силой тяготения, можно полагать, что ускорение свободного падения равно ускорению силы тяготения. На полюсе

центробежная сила инерции равна нулю и сила тяжести равна силе тяготения; на экваторе разность между этими силами имеет максимальное значение (см. разд. 7.4);

□ **вес тела**, т. е. силу, с которой тело действует на опоры, препятствующие его свободному падению. Для покоящегося тела вес равен силе тяжести.

Вес тела появляется только в том случае, если тело вынуждено двигаться с ускорением, отличным от ускорения свободного падения. Это возможно, если на тело, кроме силы тяготения, действуют и другие силы.

Вес тела есть та сила, с которой данное тело действует на другие тела, препятствующие его свободному движению в поле тяготения. Если же тело движется только под действием силы тяготения, то оно является **невесомым** (при этом траектория движения может быть любой: прямолинейной, параболической, эллиптической или круговой).

Для того чтобы в поле тяготения Земли данное тело двигалось с ускорением  $\mathbf{a}$ , отличным от  $\mathbf{g}$ , к нему должна быть приложена со стороны других тел дополнительная сила  $\mathbf{N}$ , удовлетворяющая условию:

$$\mathbf{N} + \mathbf{F} = m\mathbf{a}. \quad (112)$$

Тогда вес тела, т. е. сила, с которой данное тело действует на другие тела, будет равен:

$$\mathbf{P} = -\mathbf{N} = m\mathbf{g} - m\mathbf{a} = m(\mathbf{g} - \mathbf{a}). \quad (113)$$

Если тело покоится или движется прямолинейно и равномерно, то  $\mathbf{a} = 0$  и  $\mathbf{P} = m\mathbf{g}$ . Если тело свободно движется в поле тяготения по любой траектории и в любом направлении, то  $\mathbf{a} = \mathbf{g}$ ,  $\mathbf{P} = 0$ , и тело будет *невесомым*.



При любом движении тела в гравитационном поле другого тела всегда действует сила тяготения. Вес же появляется только в том случае, когда на данное тело, кроме силы тяготения, действуют еще и другие силы, вследствие чего тело вынуждено покоиться или двигаться с ускорением, отличным от  $\mathbf{g}$ .

### Контрольные вопросы

- ? Что называют весом тела?
- ? Каково соотношение между массой и весом?
- ? В чем отличие веса от силы тяжести?
- ? С помощью какого прибора определяется вес тела?

## 5.4. Невесомость

Когда тело покоится в поле тяготения Земли на горизонтальной плоскости, на него действуют сила тяжести и численно равная ей, но противоположно направленная сила — реакция плоскости (опоры). В результате в теле возникают внутренние усилия в виде взаимных давлений частиц друг на друга. Человеческий организм воспринимает такие внутренние усилия как привычное состояние весомости. Появляются эти внутренние усилия за счет действия реакции опоры.

Из формулы (113) видно, что если  $a < g$ , то вес тела  $P$  в ускоренно движущемся лифте (рис. 61) меньше силы тяжести. Если  $a > g$ , то вес тела изменяет знак. Это означает, что тело прижимается не к полу, а к потолку кабины лифта ("отрицательный" вес). Наконец, если  $a = g$ , то  $P = 0$ . Тело свободно падает на Землю вместе с кабиной. Такое состояние называют **невесомостью**.

**Невесомость** — состояние тела, когда его вес равен нулю, т. е. такое состояние механической системы, при котором действующее на систему гравитационное поле не вызывает давлений частиц системы друг на друга.

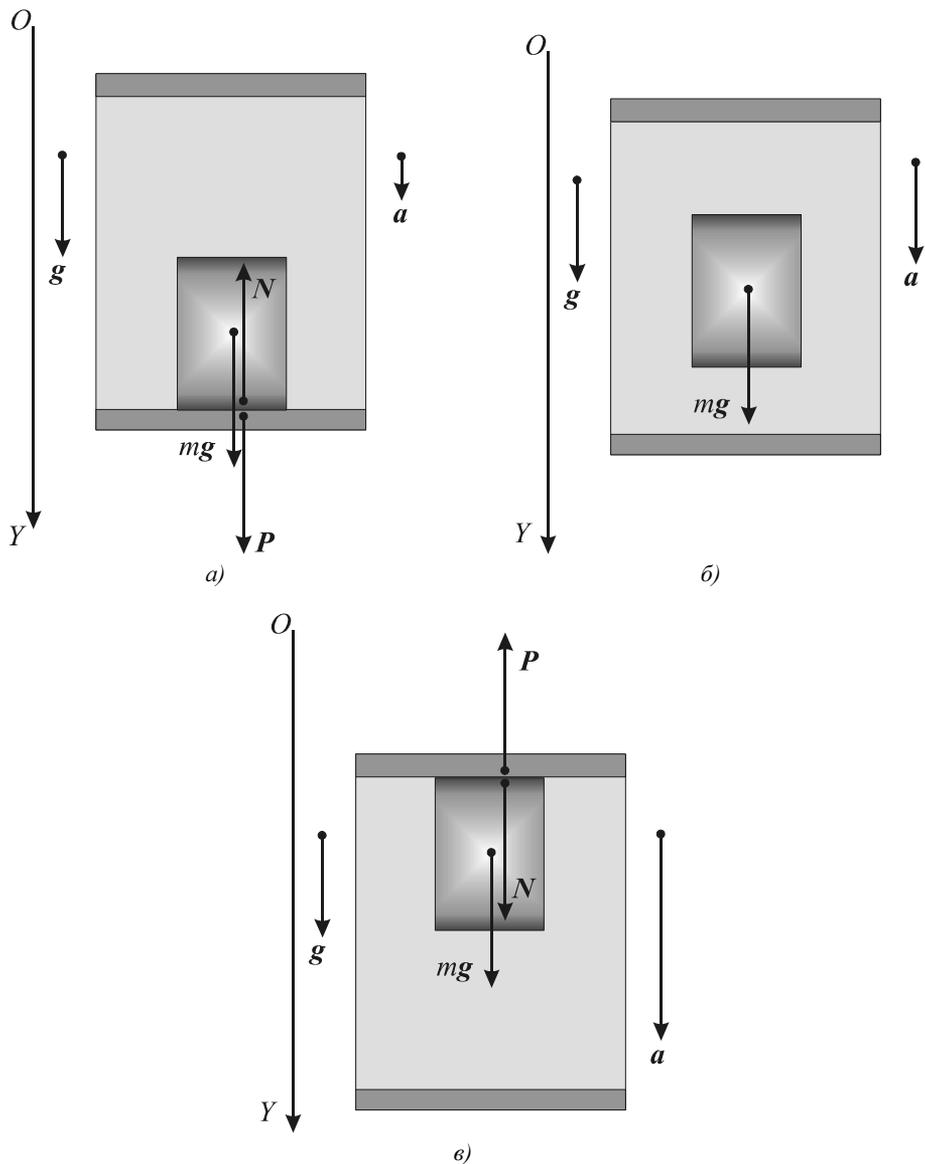
Всякое свободно падающее тело, движущееся только под действием силы тяжести, находится в состоянии невесомости.

При движении космического корабля вокруг Земли его ускорение равно ускорению силы тяжести (ускорению свободного падения), т. е. спутник находится в состоянии свободного падения. Поэтому сила давления космонавта на опору равна нулю.

Для тренировок космонавтов состояние невесомости создается на непродолжительное время во время контролируемого свободного падения самолета. Так, в 1960-х гг. на борту специально оборудованного самолета Ту-16 советские космонавты, готовясь к планировавшемуся полету на Луну, учились переходить из транспортного космического корабля в спускаемый лунный модуль и назад в условиях невесомости.

### Контрольные вопросы

- ? Что такое состояние невесомости?
- ? Каковы условия невесомости тел?
- ? Когда наступает невесомость? В чем она проявляется?



**Рис. 61.** Вес тела в ускоренно движущемся лифте. Вектор ускорения  $a$  направлен вертикально вниз. (а) —  $a < g$ ,  $P < mg$ ; (б) —  $a = g$ ,  $P = 0$  (невесомость); (в) —  $a > g$ ,  $P < 0$

## 5.5. Космические скорости

Искусственные спутники Земли (ИСЗ) двигаются за пределами земной атмосферы, и на них действуют только силы тяготения со стороны Земли. В зависимости от начальной скорости траектория космического тела может быть различной (см. разд. 4.1). Рассмотрим случай движения ИСЗ по околоземной орбите, близкой к круговой. Такие спутники летают на высотах порядка 200—300 км, и можно приближенно принять расстояние  $R$  до центра Земли равным ее радиусу  $R_3$ . Тогда *нормальное ускорение* спутника, сообщаемое ему силами тяготения, приблизительно равно ускорению свободного падения  $g$ .

Если некий объект (например, ИСЗ) обращается по круговой орбите на высоте, которая пренебрежимо мала по сравнению с радиусом Земли, то его скорость называют **первой космической скоростью**. Это наименьшая скорость, которую надо сообщить телу для превращения его в спутник Земли.

Движение спутника можно рассматривать как свободное падение, подобное движению снарядов или баллистических ракет. Различие заключается только в том, что скорость спутника настолько велика, что радиус кривизны его траектории превышает радиус Земли.

Фактически значение первой космической скорости зависит от высоты  $h$  над Землей. На тело массой  $m$ , движущееся на высоте  $h$  над Землей, по *закону всемирного тяготения*, действует сила:

$$F = G \frac{Mm}{(R+h)^2}, \quad (114)$$

где  $M$  и  $R$  — масса и радиус земного шара.

В данном случае *ускорение свободного падения* играет роль *нормального ускорения* тела, движущегося по круговой орбите вокруг Земли (спутника). Из *второго закона Ньютона* (см. разд. 3.6):

$$F = \frac{mv_1^2}{R+h}. \quad (115)$$

Тогда первая космическая скорость при отсутствии атмосферы будет равна круговой скорости:

$$v_1 = \sqrt{G \frac{M}{R+h}} = \sqrt{g(R+h)}, \quad (116)$$

$$v_1 = \sqrt{gR} = \sqrt{9,80665 \cdot 10^{-3} \cdot 6,371032 \cdot 10^3} \approx 7,91 \left( \text{км} \cdot \text{с}^{-1} \right)^1. \quad (117)$$

<sup>1</sup> При вычислении использованы средний радиус Земли и нормальное значение ускорения свободного падения.

Двигаясь с такой скоростью, спутник облетал бы Землю за время:

$$T_1 = \frac{2\pi R_3}{v_1} = 84 \text{ мин. } 12 \text{ с.} \quad (118)$$

На самом деле период обращения спутника по круговой орбите вблизи поверхности Земли несколько превышает указанное значение из-за отличия между радиусом реальной орбиты ИСЗ и радиусом Земли.

Для спутников, движущихся по круговым траекториям на значительном удалении от Земли, земное притяжение ослабевает обратно пропорционально квадрату радиуса  $r$  траектории. Скорость спутника  $v$  находится из условия:

$$\frac{v^2}{r} = g \frac{R_3^2}{r^2}, \quad v = \sqrt{gR_3} \sqrt{\frac{R_3}{r}} = v_1 \sqrt{\frac{R_3}{r}}, \quad (119)$$

$$\frac{v_0}{v_1} = \sqrt{\frac{R_1}{R_0}}, \quad (120)$$

где  $v_0$  — скорость вращения по орбите  $R_0$ , а  $v_1$  — скорость вращения по орбите  $R_1$ .

При  $h = 0$   $v_1 \approx 7,91 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$ ; для высоты 300 км  $v_1 \approx 7,7 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$ ; а для высоты 20 000 км  $v_1 \approx 3,9 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$ .

Заметим, что при запуске искусственного спутника его начальная скорость должна быть направлена по касательной к земной поверхности.

Период обращения  $T$  спутника:

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi r}{v_1} \sqrt{\frac{r}{R_3}} = \frac{2\pi R_3}{v_1} \left(\frac{r}{R_3}\right)^{3/2} = T_1 \left(\frac{r}{R_3}\right)^{3/2}, \quad (121)$$

где  $T_1$  — период обращения спутника на околоземной орбите.




---

Период обращения спутника растет с увеличением радиуса орбиты.

---

Если бы Земля была однородным шаром, и не существовало бы атмосферы, то спутник двигался бы по орбите, плоскость которой сохраняет неизменную ориентацию в пространстве относительно системы неподвижных звезд. Элементы орбиты в этом случае определяются *законами Кеплера*. Так как Земля вращается, то при каждом следующем обороте спутник движется над разными точками земной поверхности. Зная трассу спутника за один какой-либо

оборот, нетрудно предсказать его положение во все последующие моменты времени. Для этого необходимо учесть, что Земля вращается с запада на восток с угловой скоростью примерно 15 градусов в час. Поэтому на последующем обороте спутник пересекает ту же широту западнее на столько градусов, на сколько Земля повернется на восток за период вращения спутника.

Из-за сопротивления земной атмосферы спутники не могут длительно двигаться на высотах ниже 160 км. Минимальный период обращения на такой высоте по круговой орбите равен примерно 88 мин. За это время Земля поворачивается на 22,5 градуса. На широте 50 градусов этому углу соответствует расстояние в 1400 км. Следовательно, можно сказать, что спутник, период обращения которого 88 мин., на широте 50 градусов будет наблюдаться при каждом последующем обороте примерно на 1400 км западнее, чем на предыдущем.

Однако такой расчет дает достаточную точность предсказаний лишь для нескольких оборотов спутника. Если речь идет о значительном промежутке времени, то надо принять во внимание отличие звездных суток от 24 часов. Поскольку один оборот вокруг Солнца совершается Землей за 365 суток, то за одни сутки Земля вокруг Солнца описывает угол примерно в 1 градус (точнее, 0,99) в том же направлении, в каком вращается вокруг своей оси. Поэтому за 24 часа Земля поворачивается относительно неподвижных звезд не на 360 градусов, а на 361 и, следовательно, совершает один оборот не за 24 часа, а за 23 часа 56 минут. Поэтому трасса спутника по широте смещается на запад не на 15 градусов в час, а на 15,041 градусов.

Спутниковые орбиты выбираются исходя из возможностей и назначения приборов, которые размещены на спутнике. Орбиты различаются по высоте над поверхностью Земли и по ориентации плоскости вращения спутника относительно Земли. Двумя наиболее распространенными типами орбит являются геостационарные орбиты и полярные орбиты.

Нетрудно подсчитать, что при радиусе  $r$  орбиты, равном приблизительно  $6,6R_3$ , период обращения спутника окажется равным 24 часам. Спутник с таким периодом обращения, запущенный в плоскости экватора, будет неподвижно висеть над некоторой точкой земной поверхности. Такие спутники используются в системах космической радиосвязи. Орбиту с радиусом  $r = 6,6R_3$  (35 800 км) называют **геостационарной**.

Большинство исследовательских и разведывательных спутников в настоящее время летает по **полярным орбитам**. Это означает, что спутник летит к северу над одной стороной Земли, пролетает вблизи полюса, а затем летит к югу на второй половине орбиты. Полярные орбиты существенно ниже, чем геостационарные. Многие из таких спутниковых орбит являются также **солнеч-**

**но-синхронизированными** так, что спутники пролетают над выбранным местом в одно и то же время. Это обеспечивает приблизительно одинаковые условия освещенности поверхности Земли в одно и то же время года в течение последовательных лет.

Половину орбиты, по которой спутник летит в северном направлении, называют **восходящей орбитой**, а другую половину — **нисходящей**.



Первая космическая скорость — наименьшая начальная скорость, которую нужно сообщить телу у поверхности Земли, чтобы оно стало искусственным спутником Земли.

---

Будем постепенно увеличивать начальную скорость спутника. Тогда его орбита примет форму эллипса. Ближайшую к Земле точку орбиты (точку, в которой спутник отделяется от последней ступени *ракеты-носителя*) называют **перигеем**, а самую удаленную — **апогеем**. По мере увеличения скорости запуска эксцентриситет орбиты возрастает, и большая полуось стремится к бесконечности. Эллиптическая орбита вырождается в параболическую.

Скорость движения по параболе относительно Земли принято называть **второй космической скоростью**. Это наименьшая скорость, которую нужно сообщить телу, чтобы его орбита в поле тяготения стала параболической:

$$v = \sqrt{2gR_3} \approx 11,186 \text{ (км}\cdot\text{с}^{-1}\text{)}. \quad (122)$$

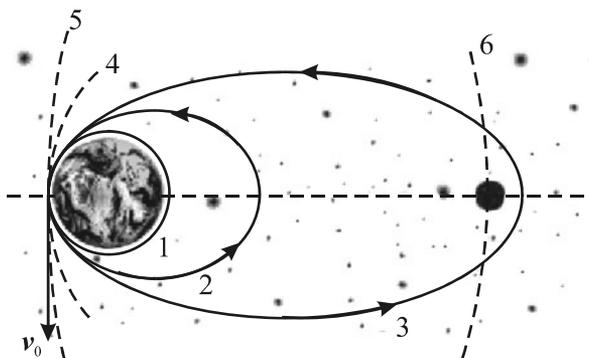


Вторая космическая скорость — наименьшая начальная скорость, которую нужно сообщить телу, чтобы оно, начав движение вблизи Земли, преодолело земное притяжение. Вторая космическая скорость зависит от высоты и у поверхности Земли равна  $11,186 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$  (рис. 62).

---

Для того чтобы покинуть пределы Солнечной системы, тело должно преодолеть еще и силы притяжения к Солнцу. Необходимая для этого скорость запуска тела с поверхности Земли — **третья космическая скорость**  $v_3$ . При запуске в направлении орбитального движения Земли  $v_3$  минимальна и составляет  $16,653 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$ . При запуске в направлении, противоположном направлению движения Земли,  $v_3 \approx 73 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$ .

Можно вычислить начальную скорость, которую необходимо сообщить телу относительно Земли, чтобы оно упало на Солнце. В этом случае скорость тела относительно Солнца будет равна нулю, а относительно Земли —  $31,816 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$ . Эту скорость иногда называют **четвертой космической скоростью**.



**Рис. 62.** Космические скорости (вблизи поверхности Земли):

- 1 —  $v = v_1$  — круговая траектория; 2 —  $v_1 < v < v_2$  — эллиптическая траектория;  
 3 —  $v = 11,1 \cdot 10^3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  — сильно вытянутый эллипс; 4 —  $v = v_2$  — параболическая траектория; 5 —  $v > v_2$  — гиперболическая траектория; 6 — траектория Луны

### Контрольные вопросы

- ? Как должна быть направлена скорость тела в момент его выхода на круговую орбиту, чтобы оно стало искусственным спутником Земли?
- ? Что такое первая космическая скорость? Выведите формулу для ее определения.
- ? Можно ли считать движение искусственного спутника Земли равноускоренным?
- ? В каком состоянии находятся тела на искусственных спутниках Земли?

## 5.6. Космические исследования

XX в. стал веком космических исследований. Вот только некоторые вехи этих исследований (см. также приложение 3).

- 4 октября 1957 г. — первый в мире запуск искусственного спутника Земли (ИСЗ) — советский ПС-1 массой 83,6 кг с космодрома "Байконур".
- 2 января 1959 г. — старт в СССР первой космической ракеты, вышедшей из сферы земного притяжения и ставшей первой искусственной планетой Солнечной системы.
- 2 февраля 1959 г. первая советская автоматическая межпланетная станция для изучения Луны и космического пространства "Мечта" ("Луна-1") пролетела на расстоянии 5—6 тыс. км от Луны и стала спутником Солнца.
- 12 апреля 1961 г. — первый в мире полет человека в космос (советский космонавт Юрий Алексеевич Гагарин (1934—1968 гг.) на ракете "Восток".

- Август 1962 г. — третий и четвертый советские космонавты Андриян Григорьевич Николаев (1929—2004 гг.) и Павел Романович Попович (1930 г.) на ракетах "Восток-3" (92 часа 22 мин.) и "Восток-4" первыми в мире совершили групповой полет двух космических кораблей.
- 16—19 июня 1963 г. — первый в мире полет женщины в космос (советский космонавт Валентина Владимировна Терешкова (1937 г.) на ракете "Восток-6"), одновременно с полетом ракеты "Восток-5", пилотируемого Валерием Федоровичем Быковским (1934 г.).
- 12 октября 1964 г. — осуществлен запуск первого в мире трехместного корабля "Восход" с экипажем в составе командира корабля Владимира Михайловича Комарова (1927—1967 гг.), бортинженера Константина Петровича Феоктистова (1926 г.) и первого космического врача Бориса Борисовича Егорова (1937—1994 гг.).
- 18 марта 1965 г. — первый в мире выход человека в открытый космос (советский космонавт Алексей Архипович Леонов (1934 г.) на ракете "Восход-2", которую пилотировал Павел Иванович Беляев (1925—1970 гг.)).
- 21 июля 1969 г. — первая в мире высадка человека на Луне (американские астронавты Нил Армстронг (Neil Alden Armstrong, 1930 г.) и Эдвин Олдрин (Edwin E. 'Buzz' Aldrin, 1930 г.) на корабле Apollo 11).
- 12 апреля 1981 г. — первый в мире космический корабль многоразового использования — американский шаттл Columbia<sup>1</sup>.
- Июль 1984 г. — первый в мире выход женщины в открытый космос (Светлана Евгеньевна Савицкая (1948 г.)).
- 21 декабря 1987 г. — советские космонавты Муса Хираманович Манаров (1951 г.), Анатолий Семенович Левченко (1941—1988 гг.) и Владимир Георгиевич Титов (1947 г.) начали рекордный полет на станции "Мир" продолжительностью более 365 суток.

За первые 43 года космической эры в космосе побывали 430 землян из 31 страны мира, в том числе 271 астронавт из США, 98 космонавтов из СССР и России, 11 граждан Германии, 9 французов, 8 канадцев, 5 представителей Японии, 4 — Италии, по 2 человека от Бельгии и Болгарии, 1 китайский космонавт и др. К концу 2004 г. космический пилотируемый налет России (учитывая СССР) составил 16 182 "человекосутки" (44 "человекогода"), у США — всего 9117 "человекосутки", у Китая — менее 1 "человекосутки". При этом на конец 2005 г. рекорд суммарной продолжительности пребывания в космосе

---

<sup>1</sup> Разбился при заходе на посадку 1 февраля 2003 г., погибли 7 астронавтов.

принадлежит российскому космонавту Сергею Константиновичу Крикалеву (1958 г.) — свыше 800 суток.

В России участки местности, приспособленные для запусков объектов в космическое пространство и оснащенные соответствующим технологическим оборудованием, называют космодромами<sup>1</sup>.

**Космодром** — комплекс специально подготовленных сооружений и оборудования, обеспечивающих сборку, подготовку к пуску и пуск ракетно-космических систем.

Чем ближе космодром находится к экватору, тем экономичнее вывод космического аппарата на орбиту. Более экономичным оказывается также запуск космического аппарата при старте ракеты-носителя в восточном направлении, поскольку в этом случае его скорость складывается со скоростью вращения Земли. В обоих случаях можно выиграть в массе полезной нагрузки, выводимой на орбиту. Так, если с космодрома "Байконур" (примерно 48° с. ш.) ракета-носитель "Союз СТ" выводит на орбиту 1400 кг полезного груза, то с космодрома "Куру" (5°18' с. ш.) та же ракета способна вывести 3000 кг полезного груза, а запуск спутников с бразильского космодрома "Алкантара" (2°17' ю. ш.) обходится на 40% дешевле, чем с Байконура. Кроме того, вблизи экватора легче осуществлять запуски космических аппаратов к другим планетам, т. к. плоскость орбит их обращения вокруг Солнца почти совпадает с плоскостью экватора Земли.

Первый советский космодром — полигон "Капустин Яр" — был основан в 1946 г. на границе Астраханской и Волгоградской областей. 2 июня 1955 г. был сформирован 5-й Научно-исследовательский полигон МО СССР (ныне космодром "Байконур"). 15 июля 1957 г. начал действовать самый северный космодром мира — "Плесецк" (Архангельская область).

В связи с тем, что самый южный советский космодром "Байконур" стал принадлежать Казахстану, в 1990-х гг. Россия начала создавать новый космодром — "Свободный" на Дальнем Востоке, на месте бывшей ракетной базы<sup>2</sup>.

В 1999 г. успешно прошли первые запуски непосредственно с экватора космических аппаратов по программе "Морской старт" (Sea Launch) с платформы "Одиссей", которая в периоды запусков находилась на экваторе в Тихом океане в районе 154° з. д. (в районе острова Рождества (Christmas Island)). После запусков платформа была отбуксирована на базу Long Beach (Калифорния, США). Сама платформа была изготовлена в Норвегии, переоборудована под стартовую позицию в Выборге (Россия), затем отбуксирована к бе-

---

<sup>1</sup> В греческом языке "дромос" означает место для бега.

<sup>2</sup> В 2007 г. было принято решение о консервации космодрома "Свободный" и строительстве нового космодрома "Восточный" в Амурской области.

регам Калифорнии. Учредителями международного проекта "Морской старт" являются Россия, США, Украина и Норвегия.

Уникальный проект "Воздушный старт" (Россия, Украина) включает в себя самолет Ан-124-100 "Руслан" и 30-метровую 100-тонную ракету "Полет". Главное преимущество системы "Воздушный старт" — это возможность запустить ракету практически из любой точки планеты (точнее — от 40° ю. ш. до 60° с. ш.). Немаловажно и другое — уникальная возможность выводить спутники на орбиты с наклоном от 0 до 115°.

### Контрольные вопросы

- ? Когда и где был запущен первый искусственный спутник Земли?
- ? Кто первым в мире совершил орбитальный полет?
- ? Почему космодромы стремятся построить как можно ближе к экватору?
- ? Почему большинство космических объектов запускают в восточном направлении?

## 5.7. Геоид

В 540 г. до н. э. Пифагор высказал предположение о шарообразности Земли, а спустя три века Архимед ввел понятие о сфероиде — поверхности, близкой по форме к сфере. В конце III—начале II в. до н. э. древнегреческий ученый Эратосфен (около 276—194 гг. до н. э.), который впервые вычислил разность географических широт Асуана и Александрии, определил размеры Земли, учитывая ее шарообразность. Зная расстояние между указанными пунктами, он рассчитал, что радиус земного шара равен 6 311 000 м.

Среди десяти красивейших экспериментов за всю историю физики этот эксперимент занял седьмое место<sup>1</sup>.

Вплоть до XVII в. господствовало представление о Земле как о шаре с таким радиусом. С появлением более совершенных технических средств проводятся уточнения размеров и формы Земли. Так, в 1669—1670 гг. французский астроном Жан Пика́р (Jean Picard, 1620—1682 гг.) по измерениям длины дуги меридиана в 1°22'55" вычислил, что радиус Земли составляет 6 371 692 м, и пришел к выводу, что Земля не имеет точной формы шара<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> По результатам опроса американских физиков, проведенного сотрудником философского факультета Университета штата Нью-Йорк Робертом Кризом (Robert Crease) и историком Brookhaven National Laboratory Стони Брук (Stony Brook).

<sup>2</sup> Сегодня считается, что средний радиус Земли 6371,032 км, экваториальный — 6378,160 км, полярный — 6356,777 км.

Данные Пикара и работа Коперника "Об обращении небесных сфер" (1534 г.) послужили основой для разработки Ньютоном в 1687 г. теории фигуры Земли. Построенная в основном как теоретическая, эта теория исходила из представления, что Земля в своем развитии прошла огненно-жидкую стадию. Рассматривая суточное вращение Земли, Ньютон заключает, что "*...фигура планеты при не очень быстром вращении должна принять форму эллипсоида вращения*".

К 1870-м гг. большинство геодезистов и геофизиков пришли к убеждению, что для Земли невозможно подобрать правильное геометрическое тело, имеющее простой закон и механизм образования. Сегодня мы знаем, что земной эллипсоид вращения отличается от шара тем, что он сплюснут у полюсов, его меридианы представляют собой эллипсы, полярная и экваториальная полуоси имеют различную длину. Это означает, что кривизна дуги меридиана у полюсов меньше, чем у экватора. Данные фактических измерений объективно подтверждают указанное различие длины дуг меридиана (табл. 10).

Таблица 10. Длина дуги 1° земного меридиана

Географическая широта, °	Длина дуги, 10 <sup>3</sup> м
0	110,6
20	110,7
40	111,0
60	111,4
80	111,7

**Геоид** — название математической фигуры Земли, ограниченной уровенной поверхностью, совпадающей с поверхностью среднего уровня воды в океане, находящейся в спокойном состоянии (без волн, приливов, течений и влияний изменения атмосферного давления) и мысленно продолженной над материками так, что она в каждой точке пересекает направление отвесной линии под прямым углом (рис. 63). Геоид по форме очень близок к эллипсоиду вращения с весьма малым ( $1/297—1/298,8$ ) коэффициентом сжатия. Относительно сфероида геоид представляет собой волнообразную поверхность: в одних местах выше, в других — ниже.

**Земной эллипсоид** — эллипсоид вращения, наиболее близкий к фигуре геоида; его размеры и положение в теле Земли определяют из градусных измерений, измерений ускорения силы тяжести и наблюдений ИСЗ. В России для

территории бывшего СССР принят эллипсоид **Красовского** — эллипсоид с большой полуосью 6 378 245 м и полярным сжатием 1/298,3, определенный из градусных измерений, проведенных в 1940 г. под руководством советского астронома-геодезиста **Феодосия Николаевича Красовского** (1878—1948 гг.).

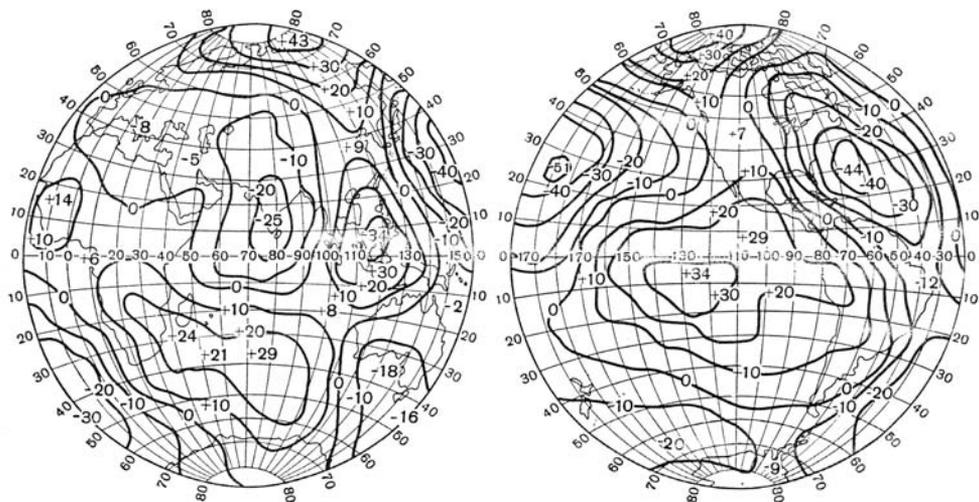


Рис. 63. Геоид: показаны отличия (в метрах) геоида от сфероида

## 5.8. Потенциал гравитационного поля

Кроме векторной характеристики поля — его *напряженности*, определяющей силовое поле, можно ввести скалярную характеристику поля — потенциал данной точки поля.

**Потенциал (потенциальная функция)** — связанная с *работой* сил поля скалярная характеристика векторных полей, к которым относятся многие силовые поля.

Пространство, где действуют силы притяжения, называют **гравитационным полем**. Пространство, где действует сила тяжести, называют **полем силы тяжести**.

Каждой точке поля соответствует определенное значение потенциальной энергии, которой обладает в этом поле материальная точка. Таким образом, поле можно характеризовать величиной потенциальной энергии, которой обладает в данной точке единичная масса.

Гравитационное поле наиболее удобно определять через **гравитационный потенциал**  $U$ :  $U \equiv \frac{E_{\Pi}}{m}$   $\Gamma = -\mathbf{grad}U$ , ( $E_{\Pi}$  — потенциальная энергия, которой обладает материальная точка массы  $m$  в данной точке поля;  $\mathbf{grad}U$  — градиент<sup>1</sup> гравитационного потенциала). Потенциал, как и *напряженность*, является "функцией точки", т. е. зависит только от *координат*.

Для случая вращающейся Земли гравитационный потенциал (определяемый силой тяготения и центробежной силой инерции):

$$U = \int_M \frac{dm}{R} + \frac{\omega^2 r^2}{2} \cos^2 \varphi, \quad (123)$$

где  $dm$  — элемент массы;  $\omega$  — угловая скорость вращения Земли;  $\varphi$  — широта места наблюдения, интеграл берется по всем массам.

В то время как ускорение свободного падения  $g$  является векторной величиной, имеющей как численное значение, так и направление, гравитационный потенциал  $U$  является скаляром и характеризуется только численным значением. Первая производная от  $U$  по некоторому направлению дает компоненту силы тяжести по этому направлению. Следовательно, использование потенциала обеспечивает вычислительные преимущества. Наиболее легко распознаваемой эквипотенциальной поверхностью ( $U = \text{const}$ ) является поверхность моря (*геоид*, см. рис. 63), которая повсюду горизонтальна и ортогональна направлению силы тяжести.

Потенциал данной точки поля тяготения — отношение работы переноса точечного тела с массой  $m$  из данной точки в бесконечность к массе этого тела.

В поле можно построить поверхности, содержащие точки с одинаковым потенциалом — **эквипотенциальные поверхности**.

Величина потенциала зависит от расстояния от точки наблюдения до центра Земли. Если точка наблюдения находится на земной поверхности, то расстояние будет равно радиусу Земли  $R$ , и:

$$U_1 = G \frac{M}{R}, \quad (124)$$

где  $G$  — гравитационная постоянная;  $M$  — масса Земли.

<sup>1</sup> Градиентом скалярного поля называют вектор  $\mathbf{grad}U = \frac{\partial U}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial U}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial U}{\partial z} \mathbf{k}$ .

Если точка наблюдения находится на продолжении земного радиуса, то расстояние будет  $R + \Delta R$ , а потенциал в этой точке:

$$U_1 = G \frac{M}{R + \Delta R}. \quad (125)$$

Следовательно, с изменением расстояния от точки наблюдения до центра Земли изменяется величина потенциала. Изменение потенциала, или его приращение, определяется по формуле:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = G \frac{M}{R + \Delta R} - G \frac{M}{R} = G \frac{M}{R} \frac{\Delta R}{R + \Delta R}. \quad (126)$$

При малом значении  $\Delta R$  можно записать:

$$\Delta U \approx G \frac{M \Delta R}{R^2} = -g \Delta R \Rightarrow g = -\frac{dU}{dR}. \quad (127)$$




---

Первая производная потенциала поля силы тяжести по радиусу  $R$  характеризует скорость изменения потенциала по какому-либо направлению и равна *ускорению свободного падения*.

---

Наибольшая скорость изменения потенциала отмечается по вертикали:

$$g_z = \frac{dU}{dz} = U_z. \quad (128)$$

Эту величину измеряют на приборах, называемых *гравиметрами*. Первые производные потенциала силы тяжести по осям  $OX$  и  $OY$  (оси горизонтальной плоскости) в начальной точке координат равны нулю и гравиметрами не измеряются:  $g_x = g_y = 0$ .

Если рассмотреть изменение ускорения свободного падения по координатным осям  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$ , то получим первые производные ускорения свободного падения или вторые производные потенциала:  $U_{xz}$ ,  $U_{yz}$ ,  $U_{zz}$ ,  $U_{xy}$ ,

$$U_{\Delta} = U_{yy} - U_{xx}.$$

Величины  $U_{xz}$  и  $U_{yz}$  показывают скорость изменения ускорения свободного падения по осям  $OX$  и  $OY$  и называются **горизонтальными градиентами**. Величина  $U_{zz}$  показывает изменение ускорения свободного падения в вертикальном направлении и называется **вертикальным градиентом**. Величины  $U_{xy}$  и  $U_{\Delta}$  характеризуют кривизну уровенной поверхности (*геоида*). За единицу измерения градиента ускорения свободного падения тела принимают

1 этвеш (Э) =  $1 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-2}$ , который соответствует изменению ускорения свободного падения в  $0,1 \cdot 10^{-5} \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$  на 1 км ( $0,1 \text{ мГал} \cdot \text{км}^{-1}$ ).

## 5.9. Аномалии ускорения силы тяжести

Земля состоит из нескольких концентрических оболочек разной плотности и мощности. Верхняя оболочка — земная кора — представлена различными по плотности геологическими образованиями, за счет чего на поверхности Земли наблюдаются гравитационные аномалии.

**Аномалией ускорения свободного падения** называют отклонение измеренного значения  $g_{\text{изм}}$  от вычисленного нормального значения  $\gamma_0$ .

Аномалию ускорения свободного падения  $\Delta g$  вычисляют по формуле:

$$\Delta g = g_0 - \gamma_0, \quad (129)$$

где  $g_0 = g_{\text{изм}}$ ;  $\gamma_0$  — нормальное значение ускорения свободного падения.

Сила тяжести изменяется с широтой вследствие несферичности Земли и потому, что угловая скорость точки на поверхности Земли уменьшается от максимума на экваторе до нуля на полюсах (см. разд. 7.4). Истинную форму Земли можно рассматривать как сплюснутый у полюсов сфероид или эллипсоид, у которого разность между экваториальным и полярным радиусами составляет примерно 21 км. Следовательно, точки вблизи экватора расположены дальше от центра масс (см. разд. 9.1) Земли, чем точки вблизи полюсов, вследствие чего сила тяжести увеличивается в направлении от экватора к полюсам. Амплитуда этого эффекта уменьшается благодаря распределению масс в Земле, обусловленному экваториальным вздутием, из-за которого в экваториальных районах сосредоточено больше массы, чем в полярных.

Суммарным эффектом всех этих факторов является то, что сила тяжести на полюсах превосходит силу тяжести на экваторе на 51 860 ге. **Формула Клеро**<sup>1</sup> описывает связи силы тяжести с широтой условного сфероида в следующем виде:

$$g_\varphi = g_\ominus \left( 1 + k_1 \cdot \sin^2 \varphi - k_2 \sin^2 2\varphi \right), \quad (130)$$

где  $g_\varphi$  — значение ускорения свободного падения на широте  $\varphi$ ;  $g_\ominus$  — значение ускорения свободного падения на экваторе;  $k_1$  и  $k_2$  — константы, зависящие от формы и скорости вращения Земли ( $k_1 = 0,005302$ ,  $k_2 = 0,0000059$ ).

<sup>1</sup> Алексис Клод Клеро (Clairaut, 1713—1765 гг.) — французский математик и астроном.

Периодические вариации силы тяжести, вызываемые совместным влиянием Солнца и Луны, называют **приливными вариациями**. Они имеют максимальную амплитуду порядка 3 ге и минимальный период около 12 ч.

**Поправка на свободный воздух** корректирует уменьшение силы тяжести с высотой в свободном воздухе, возникающее за счет увеличения расстояния от центра Земли. Для приведения к уровенной поверхности наблюдения, взятого на высоте  $h$ , используется **поправка Фая** (поправка в свободном воздухе)  $\Delta_1 g$ :

$$\Delta_1 g = 0,30861 \cdot 10^{-5} \cdot h, \quad (131)$$

где  $h$  — высота пункта над уровнем моря, м.

Поправку Фая вносят с положительным знаком, т. к. с каждым метром высоты над поверхностью сфероида ускорение свободного падения уменьшается на  $0,3 \cdot 10^{-5} \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ .

Аномалию, вычисленную с учетом поправки Фая, называют **аномалией Фая**  $\Delta g_\phi$ :

$$\Delta g_\phi = g_{изм} + \Delta_1 g - \gamma_0. \quad (132)$$

Кроме того, в измеренные значения  $g$  вносят поправку на промежуточный слой  $\Delta_2 g$ . Так как пространство между пунктом наблюдения и поверхностью сфероида заполнено породами, которые создают дополнительную силу притяжения, то в измеренные значения силы тяжести необходимо вводить **поправку на промежуточный слой**  $\Delta_2 g$  с отрицательным знаком:

$$\Delta_2 g = -0,0419 \cdot 10^{-5} \cdot \rho H, \quad (133)$$

где  $\rho$  — плотность;  $H$  — мощность промежуточного слоя.

Величина  $\Delta_2 g$ , если подставить среднее значение плотности горных пород  $\rho = 2,5 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$ , равна примерно  $0,1 \cdot 10^{-5} \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$  на 1 м мощности.

Алгебраическую сумму поправки Фая и поправки на промежуточный слой называют **поправкой Буге**. Аномалию, вычисленную с учетом поправки Буге, называют **аномалией Буге**  $\Delta g_B$ :

$$\Delta g_B = g_{изм} + \Delta_1 g + \Delta_2 g - \gamma_0. \quad (134)$$

Поправка на свободный воздух учитывает только изменения расстояния точки наблюдения от центра Земли, и в ней не принимается во внимание гравитационный эффект пород, находящихся между точками наблюдения и поверхностью приведения. Поправка Буге устраняет этот эффект.

При поправке Буге предполагается, что рельеф вокруг пункта наблюдения силы тяжести ровный. Но так бывает редко, и поэтому приходится вносить еще одну поправку, называемую **поправкой на рельеф**  $\Delta_3 g$ . Влияние рельефа невелико в районах со сглаженными формами, и в равнинных условиях редко превышает 10 ге.

Общая формула вычисления гравитационных аномалий будет иметь вид:

$$\Delta g = g_{изм} + \Delta_1 g + \Delta_2 g + \Delta_3 g - \gamma_0. \quad (135)$$

Гравитационные аномалии возникают вследствие различий в плотности или перепада плотности между геологическим телом и окружающими его породами. Для тела с плотностью  $\rho_1$  в среде с плотностью  $\rho_2$  перепад плотности  $\Delta\rho$  определяется формулой  $\Delta\rho = \rho_1 - \rho_2$ . Знак перепада плотности определяет и знак гравитационной аномалии.

Плотности пород относятся к наименее изменчивым из всех геофизических параметров. Определение плотности служит основой для определения объема элементарной ячейки (см. том *"Молекулярная физика и термодинамика" данного курса*) и заключенных в ней единиц вещества. Плотность колеблется в широких пределах вплоть до  $23,0 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$  (минералы осмистого иридия, табл. 11). Большинство распространенных типов пород имеет плотности в пределах  $(1,5—3,5) \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ . Явно преобладают минералы малой плотности (от  $2,0 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$  до  $4,0 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ).

Полиморфные модификации вещества, имеющие различную кристаллическую структуру, имеют различную плотность. Графит и алмаз, например, имеют одинаковый химический состав. Они состоят из углерода, но вследствие различий в кристаллических структурах плотность графита  $2,2 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ , а плотность алмаза  $3,5 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ . Точно так же в зависимости от структуры изменяется плотность углекислых солей кальция (аргонит и кальцит).

В соответствии с колебаниями химического состава один и тот же минерал может иметь различную плотность. Так, например, плотность сфалерита в зависимости от примесей колеблется от  $3,50 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$  до  $4,20 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ , а плотность вольфрамитов от  $7,1 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$  до  $7,5 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ . На практике эти колебания, однако, не всегда связаны только с колебаниями химического состава. Они могут быть вызваны неоднородностью исследуемого материала, недостаточно чистым отбором, пористостью и наличием трещин, а также (что часто имеет место в минералогической практике) малым количеством исследуемого вещества.

Атомный вес особенно влияет на плотность, если плотности атомов и ионов, входящих в сравниваемые минералы, резко отличаются. Так минералы бария

и свинца имеют значительно бóльшую плотность соответствующих минералов кальция, минералы ртути — бóльшую, чем у минералов цинка. Разница в плотностях непропорциональна молекулярным весам, а в некоторых случаях даже имеет обратную зависимость. Так атомный вес натрия — 23, а калия — 39, но замена натрия на калий вызывает понижение плотности (табл. 11). Это связано с увеличением ионного радиуса при увеличении атомного номера, что в значительной степени компенсирует повышение атомного веса.

Таблица 11. Некоторые плотности

Пример	Плотность, г·см <sup>-3</sup>
Белый карлик	10 <sup>6</sup>
Бокситы	2,9—3,5
Верхние части земной коры	2,67
Вселенная	10 <sup>-29</sup>
Галактика	2·10 <sup>-24</sup>
Глина	1,2—2,6
Гнейсы	2,6—2,9
Гравийно-галечные породы	3
Граниты	2,4—3,0
Грунт средней влажности	1,4—1,6
Диабаз	2,9
Доломит	2,7—2,9
Известняк	2,3—3,0
Магнетит, гематит	4,9—5,2
Межзвездный газ	3·10 <sup>-25</sup>
Мрамор	2,5—2,8
Нейтронная звезда (плотность атомного ядра)	10 <sup>14</sup>
Нефть	0,73—1,04
Песок	1,2—2,1
Песчаник	1,8—2,8
Почва	1,13—2,0
Скопление галактик	5·10 <sup>-28</sup>

Таблица 11 (окончание)

Пример	Плотность, г·см <sup>-3</sup>
Солнце	1,4
Средняя плотность Земли	5,52
Суглинок влажный	1,9—2,0
Уголь	1,0
Черная дыра (возникшая из звезды) — плотность Планка	$5 \cdot 10^{93}$
Шаровое скопление	$4 \cdot 10^{-21}$
Ядро Земли	12

Вариации силы тяжести, вызываемые изменениями, различиями плотности подземных масс, обычно имеют порядок 100 ге.



Аномалии силы тяжести зависят от распределения масс в земной коре. Широкие региональные аномалии связаны с неоднородностью плотностей в мантии.

Полное изменение нормальной составляющей напряженности силы тяжести (численно совпадающей с  $g$ )  $\approx 5,2$  Гал. Аномалии достигают  $(2—4) \cdot 10^2$  мГал, изменение за счет центробежной силы инерции  $\approx 3,3$  мГал (см. разд. 7.4), изменение за счет сплюснутости Земли  $\approx 1,8$  мГал, изменение по высоте  $\approx 3 \cdot 10^{-1}$  мГал на 1 м, максимальная амплитуда лунно-солнечных возмущений  $\approx 2,4 \cdot 10^{-1}$  мГал.

## 5.10. Принципы гравиразведки

**Гравиметрия**<sup>1</sup> — наука о методах измерения силы тяжести, об измерениях величин, характеризующих гравитационное поле Земли. Гравиметрические методы используют для определения фигуры и внутреннего строения Земли, установления связи между различными системами геодезических координат и расчета траекторий движения искусственных спутников Земли и ракет, для разведки полезных ископаемых и исследования верхних слоев земной коры.

<sup>1</sup> От лат. *gravis* — тяжелый.

Точное определение гравитационного поля Земли позволяет установить распределение масс под ее поверхностью и, следовательно, непосредственно решать важные прикладные задачи.

**Гравиметрическая разведка** — метод разведочной геофизики, основанный на изучении гравитационного поля на поверхности Земли и вблизи нее. Гравиразведка исследует аномалии силы тяжести, обусловленные неоднородными по плотности породами, слагающими земную кору, особенно ее верхнюю часть. Основное условие для гравиразведки — наличие разницы в плотности пород при перемещении в горизонтальном или вертикальном направлении, достаточные размеры и глубина залегания возмущающего тела для создания на поверхности Земли аномалии силы тяжести, которую можно выявить современными измерительными приборами (гравиметрами). Гравиразведку применяют для поисков и разведки нефтегазоносных структур, месторождений твердых полезных ископаемых, геологического картирования площадей, закрытых чехлом рыхлых отложений, тектонического районирования и т. п.

В целом для Земли гравиметрическая изученность не превышает 60%. Наиболее изучены территории Европы, США, Канады (за исключением северной части), Австралии. Морские съемки покрывают Средиземное море, Северную Атлантику, Северные части Индийского и Тихого океанов. В остальных частях Мирового океана имеются лишь отдельные гравиметрические рейсы. Территория России к настоящему времени покрыта государственной гравиметрической съемкой масштаба 1:200 000 на 75—80%. И если европейская часть России изучена почти полностью, то Сибирь и Дальний Восток изучены значительно хуже.

Измерения абсолютного значения силы тяжести чрезвычайно трудны, требуют сложной аппаратуры и продолжительного периода наблюдений. Обычно такие наблюдения выполняют с использованием больших маятников или методами падающего тела.

Измерение относительных значений силы тяжести, т. е. различий в силе тяжести между пунктами наблюдений, проще и является стандартной операцией при гравитационных съемках. Абсолютные значения силы тяжести в пунктах наблюдений можно получить путем привязки к Международной стандартной гравиметрической сети 1971 г. (IGSN-71) — сети пунктов, на которых абсолютные значения силы тяжести были определены путем привязки к пунктам абсолютных гравиметрических измерений. Используя приборы для относительных измерений силы тяжести и определяя изменения силы тяжести между пунктами IGSN-71 и полевыми пунктами наблюдений, можно определить абсолютные значения силы тяжести в этих пунктах. Приборы, способные измерять силу тяжести, называют гравиметрами.

**Гравиметр** — прибор для измерения ускорения силы тяжести по изменению деформации пружины или угла закручивания упругой нити. Различают гравиметры наземные, скважинные, морские и аэрогравиметры (в том числе устанавливаемые на космических аппаратах).

Различают два способа измерения силы тяжести: абсолютный и относительный. В **относительном способе** измеряют приращение  $\Delta g$  относительно значения  $g$  в некотором исходном пункте.

В зависимости от метода измерения гравиметры разделяются на статические и динамические. К **статическим гравиметрам** относится обширный класс приборов, основанных на принципе уравнивания силы тяжести (или момента силы тяжести) упругой силой (или упругим моментом) чувствительного элемента.

Статические гравиметры используются только для относительных определений и являются основными приборами для измерения  $\Delta g$ . По принципу действия такой гравиметр обычно аналогичен *динамометру* (см. разд. 3.4) или пружинным весам (безмену), т. е. представляет собой пружину с грузиком. Изменения веса этого грузика, вызванные вариациями силы тяжести, приводят к изменению длины пружины и являются мерой измерения силы тяжести. Чаще используются крутильные системы, в которых маятник, подвешенный на горизонтальной упругой нити или пружине, поддерживается ее упругой силой в положении, близком к горизонтальному. Системы такого типа в принципе нелинейны. При приближении маятника к положению неустойчивости резко возрастает чувствительность. Такую систему называют **астазированной**. Статические гравиметры широко применяются в гравиразведке.

Недостатком гравиметров является дрейф — постепенное изменение показаний прибора со временем, наблюдаемое при измерениях в одной и той же точке. Причиной дрейфа является неидеальная упругость пружин, которые с течением времени испытывают *пластические деформации* (см. разд. 6.1), т. е. растягиваются. Дрейф также является результатом температурных изменений, которые могут вызвать растяжение или сжатие измерительной системы, и тем самым порождая вариации измеряемых величин, не связанные с измерением силы тяжести.

К **динамическим гравиметрам** относятся струнные ( $\Delta g$  определяется по изменению частоты колебаний нагруженной струны), баллистические (измеряется время прохождения свободно падающего тела через несколько точек) и маятниковые (используется зависимость колебаний свободного маятника от  $g$ ) гравиметры.

Современная технология позволяет производить гравиметры, способные измерять изменения силы тяжести вплоть до  $0,1$  мкГал ( $10^{-9}$  м·с<sup>-2</sup>).

Гравиметры эффективно реагируют только на вертикальную составляющую гравитационного притяжения аномальной массы. Измерения возмущений силы тяжести в основном соответствуют вертикальной компоненте притяжения аномального тела. Однако очень большие аномальные массы (такие, как горные хребты) могут вызывать заметные локальные отклонения от вертикали.

Гравиметрические наблюдения широко используются при изучении больших и средних по размерам геологических структур. Уже первые морские съемки, выполнявшиеся с подводных лодок, показали большие положительные и отрицательные аномалии силы тяжести, связанные с островными дугами и океаническими глубоководными желобами соответственно; последующие работы обнаружили их латеральную непрерывность и показали, что большинство основных форм поверхности Земли можно выявить гравиметрическими съемками.

История **аэрогравиметрии** в России ведет отсчет от первых измерений гравитационного поля с самолета, выполненных А. М. Лозинской и Е. И. Поповым в середине XX в. Измерение силы тяжести с самолетов имеет целый ряд преимуществ перед другими видами гравиметрических съемок (наземная, морская) по производительности, стоимости и доступности отдаленных районов (горы, акватории, труднодоступные, малонаселенные, удаленные районы).

Создаваемые рудными телами аномалии силы тяжести невелики. Вследствие этого выявить их наземными гравиразведочными работами в ряде случаев не удастся, особенно при глубоком залегании рудных тел, небольших их размерах и влиянии различных искажающих факторов. В таких случаях необходимо повышать глубинность разведки. Большие перспективы в смысле повышения глубинности поисков и разведки твердых полезных ископаемых открывает применение **подземной гравиразведки** — гравиразведки в подземных горных выработках. Возможность проведения гравитационных измерений в разветвленной системе подземных горных выработок, на разных горизонтах, т. е. с разных сторон от возмущающих тел, значительно повышает результативность поисков и обеспечивает возможности решения не только поисковых, но и разведочных задач.

**Гравитационный каротаж**<sup>1</sup> — изучение ускорения силы тяжести в буровых скважинах для определения средних значений плотности горных пород в их естественном залегании. Исследует литологический состав горных пород и выявляет залежи полезных ископаемых. При гравитационном каротаже вдоль

---

<sup>1</sup> От франц. carottage.

ствола скважины через 50—100 м с помощью специальных скважинных гравиметров измеряется приращение силы тяжести с глубиной.

Метод **микрогравиметрии** иногда применяется для решения геотехнических задач при поисках подземных пустот и может также использоваться, например, для изучения сезонных перемещений грунтовых вод в некотором регионе.

Стоит отметить, что все сказанное о гравirazведке в приложении к Земле, вполне применимо и для исследований других небесных тел, обладающих значительным гравитационным полем.

## ГЛАВА 6

# Основы теории упругости. Трение. Элементы гидродинамики

### 6.1. Упругие силы, деформации

Все тела состоят из молекул и атомов, которые в свою очередь состоят из электронов и атомных ядер. Между молекулами (атомами) тел одновременно действуют силы и притяжения, и отталкивания. Модули этих сил зависят от расстояния между молекулами. На расстоянии, примерно равном диаметру молекулы, силы притяжения между молекулами компенсируются силами отталкивания между ними, и равнодействующая сил притяжения и отталкивания между молекулами равна нулю.

При незначительном растяжении тела расстояние между молекулами несколько увеличивается, и силы притяжения между ними начинают превосходить по модулю силы отталкивания — между молекулами начинают действовать силы притяжения, препятствующие растяжению тела.

При сжатии тела расстояние между молекулами уменьшается, вследствие чего между ними начинают преобладать силы отталкивания, препятствующие сжатию тела (рис. 64).



---

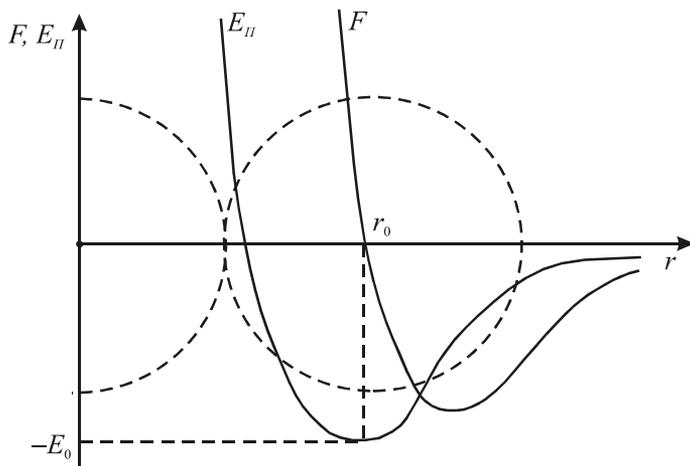
При растяжении или сжатии тела в нем возникают электромагнитные по своей природе силы, препятствующие изменению размеров тела. Это и есть **силы упругости (упругие силы)**.

---

**Деформациями**<sup>1</sup> называют изменения размеров или формы упругого тела, возникающие под действием приложенных сил. Различают **деформацию**

---

<sup>1</sup> От лат. *deformatio* — искажение.



**Рис. 64.** Сила взаимодействия  $F$  и потенциальная энергия взаимодействия  $E_{II}$  для двух взаимодействующих молекул как функция расстояния между ними ( $E_0$  — глубина потенциальной ямы) двух молекул,  $F > 0$  — сила отталкивания,  $F < 0$  — сила притяжения

**объема** (изменение объема тела без изменения его формы) и **деформацию формы** или **сдвига** (изменение формы тела без изменения его объема). В большинстве случаев наблюдаемая деформация представляет собой несколько деформаций одновременно. Любую деформацию можно свести к двум наиболее простым: растяжению (или сжатию) и сдвигу (рис. 65).

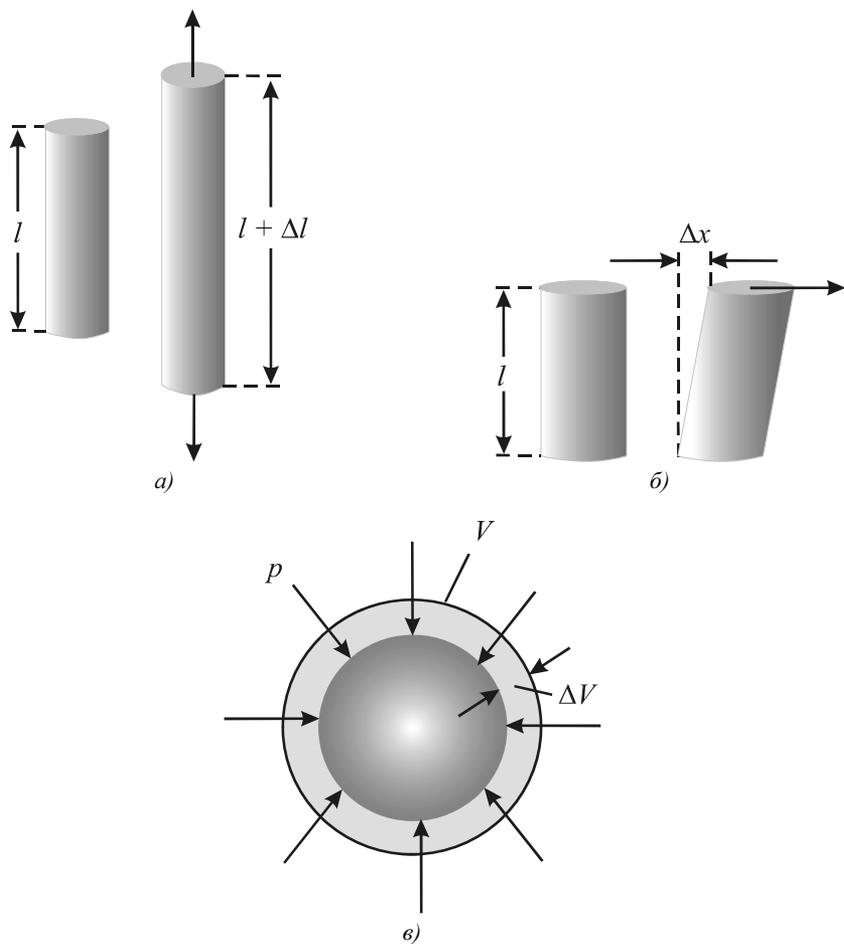
Причина деформации — изменение взаимного расположения множества частиц материальной среды, которое приводит к искажению формы и размеров тела и вызывает изменение сил взаимодействия между частицами.

Деформация твердого тела может явиться следствием фазовых превращений, связанных с изменением объема, теплового расширения, электрического заряда (обратный пьезоэлектрический эффект, электрострикция), намагничивания (магнестрикционный эффект) или же результатом действия внешних сил.

**Упругая деформация** — такое изменение формы и размеров тела, при котором после прекращения действия сил тело принимает первоначальные размеры и форму.

Силу, действующую со стороны деформированного тела на соприкасающиеся с ним другие тела и направленную в сторону, противоположную перемещению частей тела при его деформации, называют **силой упругости**.

**Упругость** — свойство тел изменять форму и размеры под действием нагрузок и самопроизвольно восстанавливать исходную конфигурацию при прекращении внешних воздействий.



**Рис. 65.** Некоторые виды деформаций твердых тел: (а) — деформация растяжения; (б) — деформация сдвига; (в) — деформация всестороннего сжатия

Тела, которые полностью восстанавливают свою форму или объем после прекращения действия сил, вызывающих деформации, называют **упругими телами**. При действии небольших сил многие горные породы можно считать упругими.

**Пластичными телами** называют тела, которые после прекращения действия внешних сил, вызвавших деформацию, не восстанавливают своей формы. При деформации этих тел также возникает сила, но это не сила упругости, т. к. ее значение зависит не от деформации, а от скорости возникновения деформации. Чем больше эта скорость, тем больше сила.

**Пластическая деформация** сохраняется после прекращения действия вызвавшей ее силы.

Твердые тела сохраняют свой объем и форму, т. к. при любой попытке их деформировать возникают силы упругости. Жидкости форму не сохраняют. Если перелить воду из графина в стакан, то это не вызовет появления сил упругости. Но если ее сжать внутри велосипедного насоса, то появится сила упругости. Точно так же сила упругости появляется при сжатии в насосе воздуха.

При действии внешних напряжений атомы смещаются из своих равновесных положений, что сопровождается увеличением потенциальной энергии тела на величину, равную работе внешних напряжений по изменению объема и формы тела. После снятия напряжений конфигурация упруго деформированного тела с неравновесными межатомными расстояниями и валентными углами оказывается неустойчивой и самопроизвольно возвращается в равновесное состояние. Запасенная в теле избыточная потенциальная энергия превращается в энергию колеблющихся атомов, т. е. в теплоту.

Пока отклонения межатомных расстояний и валентных углов от их равновесных значений малы, они пропорциональны действующим между атомами силам, подобно тому, как удлинение или сжатие пружины пропорционально приложенной силе.



---

Силы упругости возникают при попытке изменить объем или форму твердого тела, при изменении объема жидкости, а также при сжатии газа.

---

### Контрольные вопросы

- ? К какому виду взаимодействий относится взаимодействие, приводящее к появлению сил упругости?
- ? Вследствие чего появляется сила упругости?
- ? Что такое деформация?
- ? Какую деформацию называют упругой, а какую пластической?
- ? При каких условиях возникает деформация тел?
- ? Что такое сила упругости? Какова природа этой силы?
- ? Как направлены силы упругости?

## 6.2. Растяжение, сжатие, сдвиг

Деформации, которые испытывает твердое тело под действием приложенной силы, сводятся к двум основным видам: деформации растяжения (сжатия) и деформации сдвига.

Всякая внешняя сила, приложенная к поверхности твердого тела, может быть разложена на две составляющие: одну — перпендикулярную к поверхности, другую — параллельную поверхности. Первая из них вызывает деформацию, называемую **растяжением** или **сжатием**. Этот вид деформации характеризуется тем, что изменяется линейный размер твердого тела и, как следствие, его объем. Вторая создает деформацию сдвига. При деформации сдвига изменяется форма твердого тела, но не изменяется его объем (рис. 66).

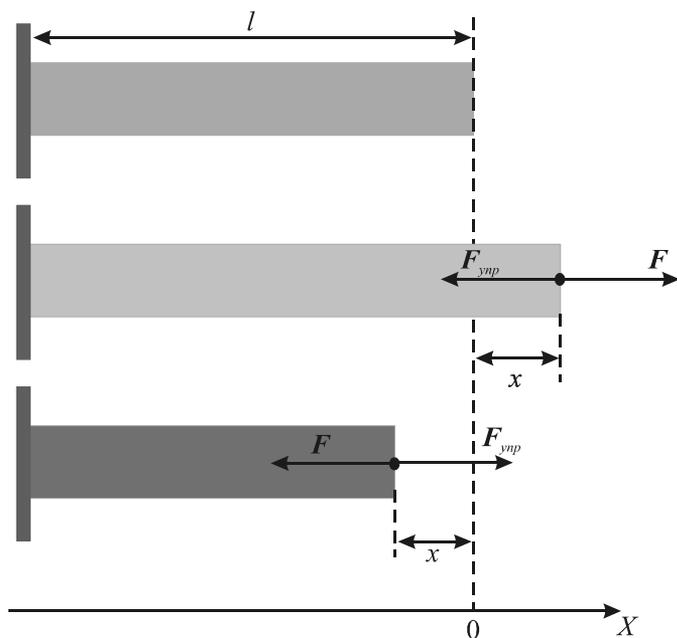


Рис. 66. Деформация растяжения ( $x > 0$ ) и сжатия ( $x < 0$ ). Внешняя сила  $F = -F_{упр}$

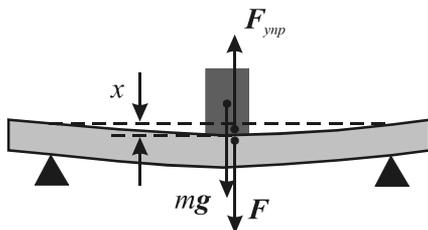
**Одноосное растяжение (сжатие)** — простейшая деформация, возникающая в призматическом брусе, подверженном равномерному растяжению или сжатию (рис. 67).

**Сдвиг** — простейшая деформация тела, вызываемая касательными напряжениями, выражается в искажении углов элементарных параллелепипедов, из которых можно считать составленным однородное тело; прямоугольный параллелепипед превращается в косоугольный, но объем его не изменяется.



Рис. 67. Одноосное растяжение

Кроме рассмотренных основных видов деформаций часто встречаются и играют большую роль еще два вида деформаций: **деформации кручения** и **деформации изгиба**. Первая из них сводится к деформации сдвига, а вторая — к деформации растяжения и сжатия (рис. 68).

Рис. 68. Деформация изгиба.  $F_{\text{упр}} = -mg$ ,  $F_{\text{упр}} = -kx$ 

Деформации обычно характеризуют относительными величинами — отношением изменения объема или линейного размера к первоначальным значениям этих величин. Так **линейная деформация (относительное удлинение)** равна:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}. \quad (136)$$

Если внешняя сила действует равномерно на любое сечение  $S$  твердого тела, то силу, приходящуюся на единичное сечение, называют **механическим напряжением** (или просто **напряжением**)  $\sigma$  при деформации:

$$\sigma = \frac{F}{S}. \quad (137)$$

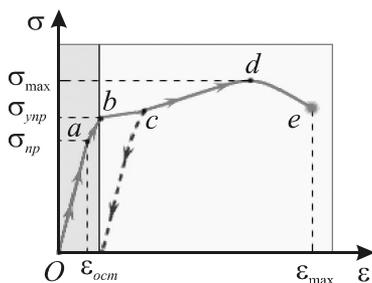
В СИ за единицу напряжения принимается **паскаль**<sup>1</sup> ( $\text{Н} \cdot \text{м}^{-2}$ , Па, Pa).

Если мысленно выделить некоторый элемент деформированного тела, то, поскольку он находится в равновесии, на него со стороны соседних слоев действуют равные по модулю и противоположные по направлению силы. Поэтому в каждой точке тела существует механическое напряжение. Можно

<sup>1</sup> Названа в честь французского физика Блеза Паскаля (Blaise Pascal, 1623—1662 гг.).

сделать вывод, что напряжение характеризует деформацию лучше, чем вызывающая деформацию сила.

Для исследования деформации растяжения стержень при помощи специальных устройств подвергают растяжению, а затем измеряют удлинение образца и возникающее в нем напряжение. По результатам опытов вычерчивают график зависимости модуля напряжения  $\sigma$  от относительного удлинения  $\varepsilon$ , получивший название **диаграммы растяжения (диаграммы напряжений)**. По оси абсцисс откладывается относительное удлинение  $\varepsilon$ , а по оси ординат — модуль механического напряжения  $\sigma$ . Типичный пример диаграммы растяжения для металлов (таких как медь или мягкое железо) представлен на рис. 69.



**Рис. 69.** Типичная диаграмма растяжения для пластичного материала (вертикальная полоса слева — область упругих деформаций)

При малых деформациях (обычно существенно меньших 1%) связь между  $\sigma$  и  $\varepsilon$  оказывается линейной (участок  $Oa$  на диаграмме). При этом при снятии напряжения деформация исчезает. Это участок упругой деформации. Максимальное значение  $\sigma = \sigma_{пр}$ , при котором сохраняется линейная связь между  $\sigma$  и  $\varepsilon$ , называют **пределом пропорциональности** (точка  $a$ ).

При дальнейшем увеличении напряжения связь между  $\sigma$  и  $\varepsilon$  становится нелинейной (участок  $ab$ ). Однако при снятии напряжения деформация практически полностью исчезает, т. е. восстанавливаются размеры тела. Максимальное напряжение на этом участке называют **пределом упругости**  $\sigma_{упр}$  (предельное напряжение упругой деформации).

Если  $\sigma > \sigma_{упр}$ , образец после снятия напряжения уже не восстанавливает свои первоначальные размеры, и у тела сохраняется **остаточная деформация**  $\varepsilon_{ост}$ . Это участки пластических деформаций (участки  $bc$ ,  $cd$  и  $de$ ). На участке  $bc$  деформация происходит почти без увеличения напряжения. Это явление называют текучестью материала.

**Текучесть** — свойство тел пластически или вязко деформироваться под действием напряжений. **Предел текучести** — напряжение, при котором начинает развиваться пластическая деформация.

Увеличение напряжения приводит, в конце концов, к разрушению деформирующегося твердого тела, при растягивающем напряжении — к разрыву. Величину этого напряжения называют **пределом прочности** твердого тела.

В точке  $d$  достигается наибольшее напряжение  $\sigma_{\max}$ , которое способен выдержать материал без разрушения (предел прочности). В точке  $e$  происходит разрушение материала.

Материалы, у которых диаграмма растяжения имеет вид, показанный на рис. 69, называют **пластичными**. У таких материалов обычно деформация  $\varepsilon_{\max}$ , при которой происходит разрушение, в десятки раз превосходит ширину области упругих деформаций. К таким материалам относятся, например, многие металлы.

У некоторых веществ (например, бронза, латунь) текучесть почти не наблюдается. У других (например, чугун, закаленная сталь) предел упругости и предел прочности очень близки друг к другу. В таких веществах пластические деформации практически невозможны — упругая деформация переходит в разрушение. Материалы, у которых разрушение происходит при деформациях, лишь незначительно превышающих область упругих деформаций, называют **хрупкими** (например, стекло, фарфор, чугун).

**Жесткость** — способность тела или конструкции сопротивляться образованию деформаций.

Под **твердостью** понимают степень сопротивления материала внешнему механическому воздействию. В минералогической практике для приближенного определения твердости исследуемого объекта последний сравнивается с эталонами **минералогической шкалы твердости** или **шкалы твердости Мооса**<sup>1</sup> (табл. 12).

Более твердые эталоны царапают исследуемый объект, более мягкие — царапаются ими. Твердость обычно указывается с точностью до 0,5 балла (табл. 13).

#### Пример

Твердость стальной иглы или ножа 5,5—6, медной иглы — 3, медного купороса (хальконита) — 2,5, ногтя — 1—1,5. □

---

<sup>1</sup> Шкала твердости Мооса предложена в 1811 г. немецким минерологом Фридрихом Моосом (Friedrich Mohs, 1773—1839 гг.).

**Таблица 12.** Эталоны минералогической шкалы твердости (Мооса)

Минерал	Твердость
Тальк $Mg_3(OH)[Si_4O_{10}]$	1
Каменная соль NaCl, галит (гипс)	2
Кальцит $Ca(CO_3)$	3
Флюорит $CaF_2$	4
Апатит $Ca_5F[PO_4]$	5
Полевой шпат $K[AlSi_3O_8]$ , ортоклаз	6
Кварц $SiO_2$	7
Топаз $Al_2[SiO_4](F,OH)_2$	8
Корунд $Al_2O_3$	9
Алмаз C	10

**Таблица 13.** Твердость некоторых ювелирных камней

Название	Твердость по шкале Мооса средняя (пределы изменения)
Агальматолит	1
Малахит, мраморный оникс, родохрозит	3 (3,5—4)
Кианит (дистен)	4 (4,5—7)
Танзанит, скаполит	6
Рубин, сапфир	9

Твердость зависит от ряда факторов, главнейшими из которых являются меж-атомные расстояния, валентность атомов<sup>1</sup>, координационное число<sup>2</sup> и природа химической связи.

<sup>1</sup> **Валентность** (от лат. *valentia* — сила) — способность атома химического элемента (или атомной группы) образовывать определенное число химических связей с другими атомами (или атомными группами). Вместо валентности часто пользуются более узкими понятиями, например степень окисления, координационное число.

<sup>2</sup> **Координационное число** определяет число ближайших к данному атому соседних атомов в кристаллической решетке (атомной структуре кристалла) или молекул в молекулярных кристаллах.

Под **хрупкостью** обычно понимают свойство материала крошиться при царапании острием ножа по его поверхности. Материалы, дающие черту с порошком по краям, являются хрупкими. О **ковкости** материалов свидетельствует гладкий блестящий след. Ковкие материалы при ударе по ним могут быть расплющены в тонкие пластинки. Хрупкость устанавливается по появлению трещин в исследуемом материале при нагрузке. Нагрузка, при которой появляется первая видимая трещина, носит название **числа хрупкости**. **Шкала хрупкости** приведена в табл. 14. При изучении хрупкости минерала наблюдается резкое проявление анизотропии: на различных гранях одного и того же минерала трещина возникает при различной нагрузке. Хрупкость, как и твердость, может быть использована в качестве важного диагностического свойства.

Таблица 14. Шкала хрупкости

Балл	Характеристика хрупкости	Минимальная нагрузка, при которой возникает трещина, г	Типичные минералы
I	Весьма хрупкий	При всех нагрузках	Пирит, гипс
II	Хрупкий	20 и выше	Пентландит, тетраэдрит
III	Слабо пластичный	50 и выше	Кварц, пирротин
IV	Пластичный	100 и выше	Магнетит
V	Весьма пластичный	При нагрузке 200 трещины не образуются	Медь, галенит

**Гибкостью** называют свойство некоторых материалов изгибаться при механическом воздействии без хрупкой деформации.

### Контрольные вопросы

- ? Назовите виды деформаций.
- ? Объясните, что происходит с телом при его растяжении и сжатии.
- ? Что называют абсолютным удлинением тела?
- ? Что называют относительным удлинением?
- ? Что называют механическим напряжением? Какова единица механического напряжения в СИ?

- ? В чем сходство и различие деформации сдвига и кручения?
- ? Охарактеризуйте деформации изгиба.
- ? Начертите и объясните диаграмму растяжений для металла.
- ? Что называют пределом пропорциональности? упругости? текучести? прочности?
- ? Что называют пластичностью?
- ? Что называют хрупкостью?
- ? Что такое жесткость?
- ? Какова единица жесткости в системе СИ?

### 6.3. Закон Гука

В области упругих деформаций напряжение деформации и относительная линейная деформация связаны **законом Гука**<sup>1</sup>:

$$\varepsilon = \alpha \sigma, \quad (138)$$

где  $\alpha$  — **коэффициент деформации** данного твердого тела.

Относительное удлинение  $\varepsilon$  в формуле (138) взято по модулю, т. к. закон Гука справедлив как для деформации растяжения, так и для деформации сжатия, когда  $\varepsilon < 0$ .

Закон Гука установлен только для абсолютно упругих тел. Закон Гука выполняется и для большинства горных пород, если деформации и напряжения не слишком велики. Чем меньше величина наблюдаемых деформаций, тем ближе оказывается вещество по своим свойствам к абсолютно упругому телу.

Вблизи области разрыва возникают колоссальные напряжения, и здесь закон Гука неприменим. Только для областей, где деформация мала, можно использовать выводы, вытекающие из этого закона.

В качестве примера рассмотрим упругий длинный брус круглого сечения, закрепленный торцом на неподвижной опоре (рис. 70).

К противоположному концу бруса приложена сила  $F$ . Пусть длина бруса до приложения силы равна  $l$ , а диаметр его равен  $d$ . Под действием силы  $F$  размер и форма бруса изменятся: брус удлинится на величину  $\Delta l$ , а его диаметр уменьшится на величину  $\Delta d$ . Согласно закону Гука между приложен-

---

<sup>1</sup> Открыт эмпирически в 1660 г. Гуком.

ным напряжением и возникающими деформациями должна существовать прямая пропорциональность. Величина напряжения  $\sigma$ , действующего на единицу площади поперечного сечения бруса, будет равна:

$$\sigma = \frac{4F}{\pi d^2} \quad (139)$$

и, следовательно:

$$\Delta l = a\sigma, \quad (140)$$

$$\Delta d = b\sigma, \quad (141)$$

где  $a$  и  $b$  — коэффициенты пропорциональности.

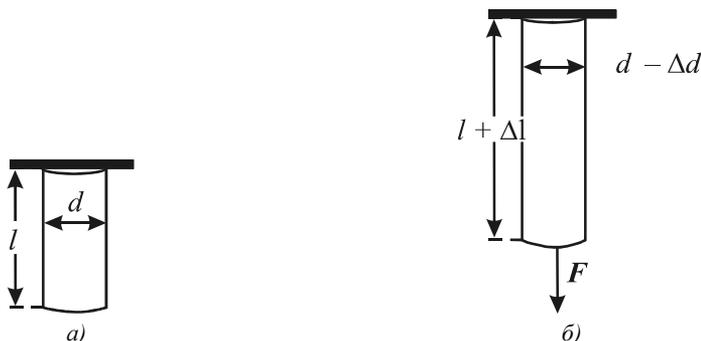


Рис. 70. К закону Гука



Закон Гука — основной закон теории упругости, выражающий линейную зависимость между напряжениями и малыми деформациями в упругой среде: при растяжении стержня его удлинение пропорционально растягивающей силе.

#### Контрольные вопросы

- ? Сформулируйте закон Гука.
- ? Запишите закон Гука для деформации растяжения или сжатия стержня.
- ? Постройте график, иллюстрирующий закон Гука.

## 6.4. Модули Юнга и сдвига

Характеристикой жесткости материалов являются модули упругости.

Около 1800 г. английский ученый Томас Юнг (Thomas Young, 1773—1829 гг.) пришел к выводу, что если пользоваться не абсолютными значениями сил и смещений в конструкциях, а напряжениями и деформациями, то закон Гука можно записать в следующем виде:

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \varepsilon = E\varepsilon, \quad (142)$$

где  $E = \frac{1}{\alpha}$  — модуль деформации при линейном растяжении твердого тела (**модуль Юнга**):

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}. \quad (143)$$

Модуль Юнга или **модуль продольной упругости**  $E$  — отношение нормального (направленного по нормали к поверхности) напряжения  $\sigma$  к относительному удлинению  $\varepsilon$ , вызванному этим напряжением в направлении его действия.




---

Модуль Юнга характеризует сопротивляемость материала упругой деформации растяжения или сжатия. Модуль Юнга численно равен напряжению деформации, вызывающему единичную деформацию, т. е. растяжение твердого тела на единицу (увеличение размера твердого тела в 2 раза).

---

Для большинства широко распространенных материалов модуль Юнга определен экспериментально (табл. 15). Чем больше модуль Юнга, тем меньше деформируется стержень при прочих равных условиях.

Подставив в формулу (142) выражения (137) и (136), получим:

$$\frac{F}{S} = E \frac{|\Delta l|}{l}. \quad (144)$$

Отсюда:

$$F = \frac{SE}{l} |\Delta l|. \quad (145)$$

Обозначим:

$$\frac{SE}{l} \equiv k - \text{жесткость стержня}, \quad (146)$$

тогда:

$$F = k|\Delta l|. \quad (147)$$

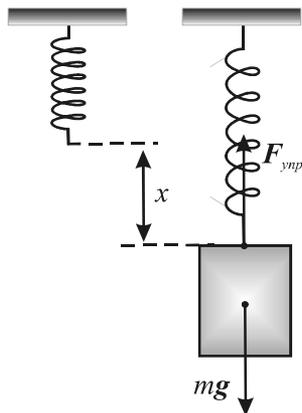


Жесткость  $k$  стержня прямо пропорциональна произведению модуля Юнга на площадь поперечного сечения стержня и обратно пропорциональна его длине.

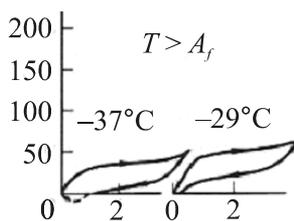
Частное проявление *закона Гука*: сила упругости, возникающая при деформации пружины (рис. 71), прямо пропорциональна удлинению пружины:

$$(F_{\text{упр}})_x = -kx, \quad (148)$$

где  $x$  — удлинение пружины;  $k$  — постоянный коэффициент, называемый **жесткостью пружины**, "минус" означает, что сила упругости направлена в сторону, противоположную перемещению частиц при деформации пружины, т. е. в сторону, противоположную удлинению  $x$  пружины.



**Рис. 71.** Деформация растяжения пружины.  $F_{\text{упр}} = -mg$ ,  $F_{\text{упр}} = -kx$



**Рис. 72.** Диаграммы "напряжение-деформация" сплава CuZn

При пластических деформациях твердых тел наблюдается явление упругого гистерезиса<sup>1</sup>. **Упругий гистерезис** — различие в значениях деформаций в теле при одном и том же механическом напряжении в зависимости от значения предварительной деформации тела. Площадь петли упругого гистерезиса пропорциональна работе при пластической деформации (рис. 72).

<sup>1</sup> Гистерезис по-гречески означает "память".

Таблица 15. Механические свойства некоторых материалов [4, 44]

Материал	Модуль Юнга $E$ , $10^7$ Па	Модуль сдвига $G$ , $10^7$ Па	Коэффициент Пуассона $\nu$	Предел прочности при растяжении/сжатии, МПа
Бетон	1500—4000	700—1700	0,1—0,15	-/5—35
Бронза алюминиевая, литье	10300	4100	0,25	-/5—35
Бронза фосфористая катаная	11300	4100	0,32—0,35	
Гранит	3500—5000	1400—4400	0,1—0,15	3/150—180
Известняк плотный	3500	1500	0,2	
Кварцевая нить (плавленая)	7300	3100	0,17	
Коллаген	$(10—100) \cdot 10^{-1}$			100
Костная ткань	$0,10 \cdot 10^4$			100
Латунь	$(9,7—10) \cdot 10^3$		0,34—0,4	220—550/-
Латунь корабельная катанная	$0,93 \cdot 10^4$	3600	0,36	
Латунь холоднотянутая	$1,23 \cdot 10^4$	3400—3600	0,32—0,42	
Мрамор	3500—5000	1400—4400	0,1—0,15	
Резина мягкая вулканизованная	0,15—0,5	0,05—0,15	0,46—0,49	
Сталь легированная (кремне-хромомарганцовистая)	$2,00 \cdot 10^4$	8000	0,25—0,30	1550/-
Сталь углеродистая (машино-подделочная)	$2,00 \cdot 10^4$	800	0,24—0,28	320—800/-
Стекло (крон)	$(5,1—7,1) \cdot 10^3$	1750—2900	0,17—0,32	
Титан	11 600	4400	0,32	
Целлюлоид	170—190	65	0,39	50—70/-
Цинк катаный	8200	3100	0,27	50—70/-
Чугун белый	11 300—11 600	4400	0,23—0,27	14—25/до 1750

При повторном действии силы на твердое тело, испытывавшее пластическую деформацию, с ростом напряжения деформации  $\sigma$  относительная деформа-

ция  $\varepsilon$  снова растет в соответствии с *законом Гука* с тем же значением модуля Юнга, т. е. с тем же наклоном прямой, но предел упругости теперь будет равен тому максимальному напряжению, которым закончилось первое деформирование.



Пластическая деформация приводит к повышению предела упругости твердого тела, т. е. к его упрочению.

Упрочение, которое достигается в результате пластической деформации, может быть устранено, если подвергнуть деформированное тело длительному нагреву при высокой температуре. Этот прием называют **отжигом** деформации.

Линейное растяжение или сжатие твердого тела сопровождается изменением его поперечного размера (см. рис. 70). Эту деформацию характеризуют **относительной деформацией поперечного размера (сечения)**:

$$\varepsilon' = \frac{\Delta d}{d}. \quad (149)$$

**Модуль объемного сжатия (модуль объемной упругости, объемный модуль упругости, модуль всестороннего сжатия)**  $K$  характеризует способность материала сопротивляться изменению его объема, не сопровождающемуся изменением формы (рис. 73). Он равен отношению величины нормального напряжения к величине **относительного объемного сжатия**  $\theta$ , вызванного этим напряжением:

$$K = \frac{\sigma}{\theta}. \quad (150)$$

Модуль объемного сжатия  $K$  всегда несколько меньше, чем модуль Юнга  $E$ .

При *деформации сдвига* величину смещения называют **абсолютным сдвигом** одной грани относительно другой грани. Угол  $\gamma$  деформации называют **углом сдвига**, а тангенс угла  $\gamma$  — **относительным сдвигом**.

**Модуль сдвига**  $G$  характеризует способность материала сопротивляться изменению формы при сохранении его объема. По величине он равен отношению касательного напряжения  $\tau$  к величине угла сдвига  $\gamma$ , определяющего искажение прямого угла между плоскостями, по которым действуют касательные напряжения:

$$G = \frac{\tau}{\gamma}, \quad \text{tg} \gamma \approx \gamma = \frac{F}{SG}, \quad (151)$$

где  $S$  — площадь грани;  $G$  — модуль сдвига. Можно показать, что  $G < 0,5E$ .

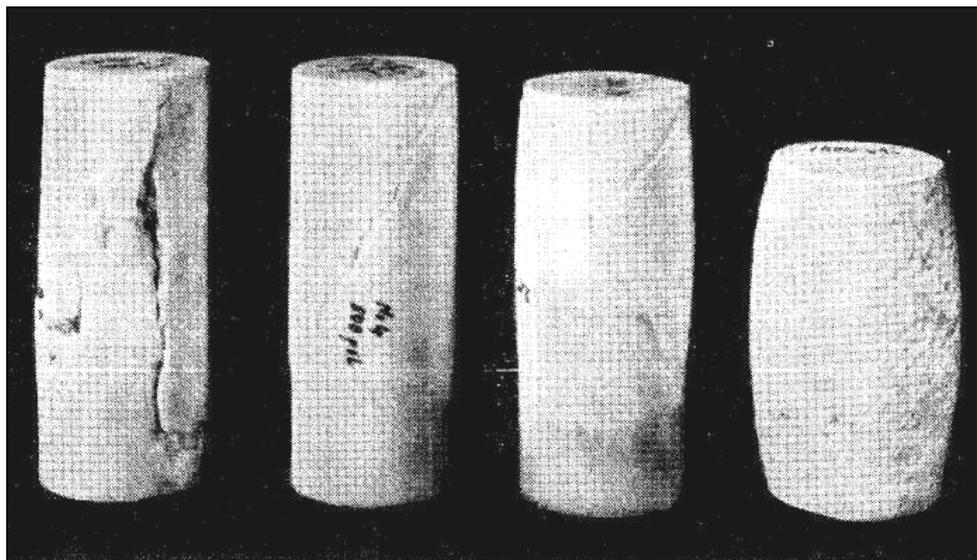


Рис. 73. Образец мрамора после деформации при различных величинах всестороннего давления (1 бар, 35 бар, 300 бар, 1000 бар)

Отношение между относительной величиной деформации поперечного размера и относительной величиной линейной деформации твердого тела (рис. 70) называют **коэффициентом поперечных деформаций (коэффициентом поперечного сжатия, коэффициентом Пуассона<sup>1</sup>)**  $\nu$ :

$$\nu = \frac{\frac{\Delta d}{d}}{\frac{\Delta l}{l}} \quad (152)$$

Величина  $\nu$  определяет относительное изменение объема деформируемого твердого тела, зависит от материала тела и является одной из важных постоянных, характеризующих его упругие свойства. Коэффициент Пуассона всегда меньше 0,5. У большинства материалов  $\nu$  близок к 0,5.

<sup>1</sup> По фамилии французского физика Симеона Дени Пуассона (Siméon Denis Poisson, 1781—1840 гг.).



Коэффициент Пуассона  $\nu$  является мерой пропорциональности между относительными деформациями в направлении, перпендикулярном к вектору приложенной силы и параллельном ему.

---

Перечисленные характеристики упругих свойств функционально связаны между собой следующими соотношениями:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad (153)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}. \quad (154)$$

Таким образом, зная две из этих характеристик, можно рассчитать значения двух других. Обычно для горных пород экспериментально определяют характеристики  $E$  и  $\nu$ .

Интересно отметить, что такую же пару характеристик, по которым можно определить остальные параметры упругости однородного массива, представляют его плотность и скорость распространения в нем упругих колебаний (сейсмической волны).



Модуль Юнга  $E$  и коэффициент Пуассона  $\nu$  полностью характеризуют упругие свойства твердого тела при определенной температуре, т. е. в изотермических условиях.

---

Упругие свойства среды могут быть также определены другими парами констант, например, постоянными Лямэ  $\lambda$  и  $\mu$ , скоростями распространения продольных и поперечных волн.

**Постоянные Лямэ** связаны с модулем Юнга  $E$  и коэффициентом Пуассона  $\nu$  следующими соотношениями:

$$\lambda = \frac{\nu \cdot E}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}. \quad (155)$$

Все сказанное, строго говоря, справедливо лишь для однородных изотропных тел. Реальные тела редко бывают однородными. Но современная техника позволяет выращивать макрокристаллы, обладающие большой однородностью. Поэтому пределы упругости и прочности у них гораздо выше, чем у поликристаллов.

Всестороннему сжатию могут подвергаться не только твердые тела, но и жидкости и газы. У воды  $K = 2,2 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$ , у стали  $K = 1,6 \cdot 10^{11} \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$ . На дне Мирового океана, на глубине порядка 4 км, давление  $p$  приблизительно равно  $4 \cdot 10^7 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$ . В этих условиях относительное изменение  $\Delta V/V$  объема воды составляет 1,8%, в то время как для стального тела оно составляет всего лишь 0,025%, т. е. в 70 раз меньше. Твердые тела с их жесткой кристаллической решеткой значительно менее сжимаемы по сравнению с жидкостями, атомы и молекулы которых не так сильно связаны со своими соседями. Сжимаемость газов на много порядков выше, чем у жидкостей и твердых тел. Величина модуля объемного сжатия определяет скорость звука в данном веществе.

### Контрольные вопросы

- ? Каков физический смысл модуля упругости?
- ? Выразите жесткость стержня через модуль Юнга.

## 6.5. Силы трения покоя, скольжения и качения

**Трение** — один из видов взаимодействия тел. Оно возникает при соприкосновении двух тел. Трение, как и все другие виды взаимодействия, подчиняется *третьему закону Ньютона*: если на одно из тел действует сила трения, то такая же по модулю, но направленная в противоположную сторону сила действует и на второе тело.

**Внешнее трение** — механическое сопротивление, возникающее в плоскости касания двух соприкасающихся тел при их относительном перемещении.

Физическая картина трения довольно сложна. Причиной трения является и непосредственное механическое взаимодействие между элементарными участками поверхностей соприкасающихся тел, и электромагнитное взаимодействие других участков, не имеющих механического контакта.

**Сила трения** — сила сопротивления, возникающая при непосредственном соприкосновении двух тел. Силы трения, как и *упругие силы*, имеют электромагнитную природу. Они возникают вследствие взаимодействия между атомами и молекулами соприкасающихся тел.

Трение, возникающее при относительном покое тел, называют **трением покоя**.

Если к телу приложена сила, параллельная поверхности соприкосновения, то **сила трения покоя**  $F_{тр}$  (рис. 74) по модулю равна приложенной внешней силе  $F_{внешн}$  и направлена в противоположную сторону:

$$F_{тр} = -F_{внешн}. \quad (156)$$

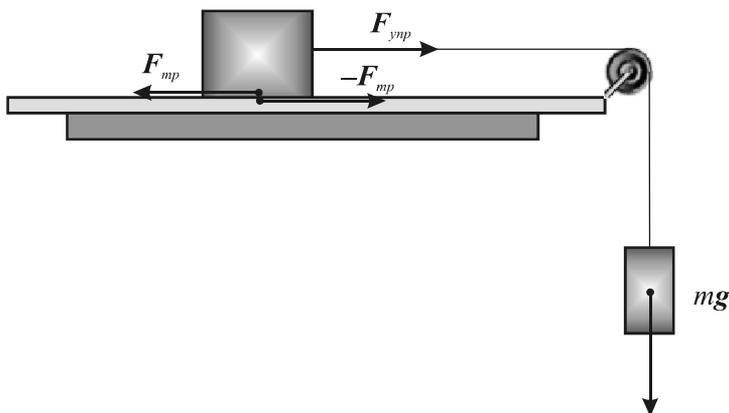


Рис. 74. Сила трения покоя ( $v = 0$ ).  $F_{тр} = -F_{упр}$

Сила трения покоя не может превышать некоторого максимального значения  $F_{тр\max}$ , называемого **предельной силой трения**. Если внешняя сила больше предельной силы трения, происходит относительное проскальзывание. Силу трения в этом случае называют **силой трения скольжения**. При решении многих простых физических задач силу трения скольжения можно считать независимой от величины относительной скорости тел и равной максимальной силе трения покоя (рис. 75).




---

Сила трения скольжения — сила, возникающая при движении одного тела по поверхности другого при  $F_{внешн} > F_{тр\max}$ , препятствующая этому движению и оказывающая механическое сопротивление в плоскости касания двух прижатых друг к другу тел.

---

Силу, перпендикулярную поверхности соприкосновения (и, например, обусловленную действием *силы тяжести*), называют **силой нормального давления**.

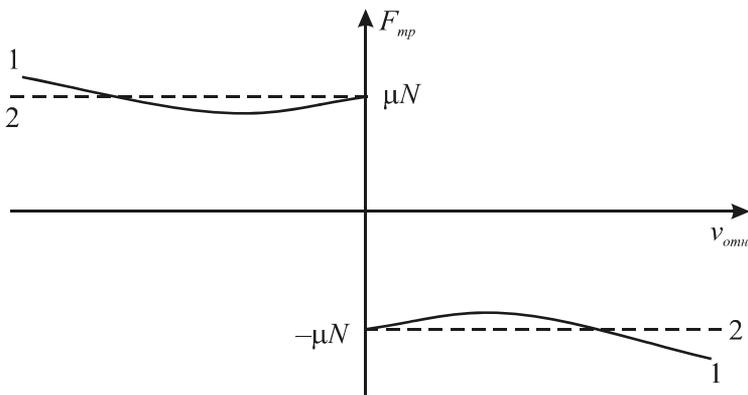


Рис. 75. Реальная (1) и идеализированная (2) характеристики трения

Еще Леонардо да Винчи в 1519 г. утверждал, что сила трения, возникающая при контакте тела с поверхностью другого тела, пропорциональна нагрузке (силе прижатия), направлена против направления движения и не зависит от площади контакта. К аналогичным результатам в 1699 г. пришел французский физик и геофизик Гийом Амонтон (Amontons, 1663—1705 гг.). В 1781 г. окончательную формулировку законы трения нашли в работах французского инженера Шарля Огюстена Кулона (Charles-Augustin de Coulomb, 1736—1805 гг.). Работы Леонардо да Винчи стали известны позднее.

Сила сухого трения скольжения прямо пропорциональна силе нормального давления — **закон Кулона—Амонтона**:

$$F_{тр} = F_{тр\max} = \mu N, \quad (157)$$

где  $\mu$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от материалов трущихся поверхностей и не зависящий от силы нормального давления, называемый **коэффициентом трения скольжения**;  $N$  — модуль силы реакции опоры.

Коэффициент трения  $\mu$  — величина безразмерная. Обычно коэффициент трения меньше единицы. Он зависит от материалов соприкасающихся тел и от качества обработки поверхностей. В зависимости от величины коэффициента трения скольжения пары трения делят на две группы: **фрикционные<sup>1</sup> материалы**, имеющие большой коэффициент трения (обычно 0,3—0,35, редко 0,5—0,6), и **антифрикционные**, имеющие коэффициент трения без смазки 0,15—0,12, при граничной смазке 0,1—0,05.

<sup>1</sup> От лат. *frictio* — трение.

Антифрикционные материалы обладают низким коэффициентом трения и применяются для изготовления деталей, работающих главным образом в условиях трения скольжения (подшипники, втулки, вкладыши и т. д., табл. 16). К антифрикционным материалам относятся: сплавы на основе Sn или Pb (бabbиты), Cu (бронзы), Fe (серый чугун) и др.; пластмассы (текстолит, фторопласт-4 и др.); спеченные материалы (бронзографит, железографит); некоторые виды древесины и древеснослоистых пластиков; резины.

**Таблица 16.** Значения коэффициента трения скольжения для некоторых пар материалов

Материалы	Коэффициент трения, $\mu$
Древесина по древесине	0,20—0,50
Древесина по льду	0,035
Металл по металлу	0,15—0,20
Металл по металлу при смазке	0,07—0,10
Резина (шина) по сухому асфальту	0,50—0,70
Резина (шина) по твердому грунту	0,4—0,6

Силы трения возникают и при качении тела. Однако **силы трения качения** обычно достаточно малы, и при решении простых задач этими силами пренебрегают.

### Контрольные вопросы

- ? Что такое сила трения?
- ? Сформулируйте закон Кулона—Амонтона.

## 6.6. Гидродинамика

**Гидроаэромеханика**<sup>1</sup> — раздел механики, посвященный изучению равновесия и движения жидких и газообразных сред и их взаимодействия между собой и с твердыми телами. **Гидромеханика** — раздел гидроаэромеханики,

<sup>1</sup> От греч. *hýdōr* — вода, *aēr* — воздух.

в котором изучаются движение и равновесие несжимаемых жидкостей и их взаимодействие с твердыми телами.

Еще в III в. до н. э. были открыты законы гидростатики, послужившие основой теории равновесия жидкости и плавания тел. Законы сопротивления, определявшие силы, действующие на тело при его движении в жидкости и впервые теоретически сформулированные Ньютоном, создали возможности развития гидродинамики.

**Гидродинамика** — раздел гидромеханики, в котором изучается движение несжимаемых жидкостей и их взаимодействие с твердыми телами или поверхностями раздела с другой жидкостью (газом).

Введем некоторые понятия гидродинамики.

**Струя** — форма течения жидкости или газа, при которой жидкость (газ) течет в окружающем пространстве, заполненном жидкостью (газом) с отличающимися от струи параметрами (скоростью, температурой, плотностью, составом и т. п.).

**Линия тока** — кривая, касательная к которой в данной точке совпадает с направлением скорости течения в данной точке.

**Трубка тока** — часть жидкости, ограниченная линиями тока.

Различают два вида движения жидкости — ламинарное и турбулентное.

**Ламинарное<sup>1</sup> (слоистое) течение** — течение, при котором жидкость (или газ) перемещается слоями без перемешивания (рис. 76).

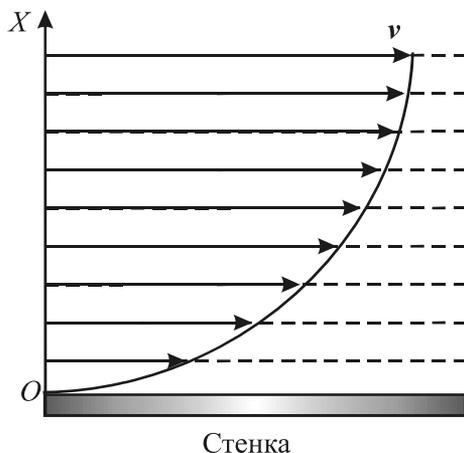


Рис. 76. Распределение скоростей при ламинарном течении

<sup>1</sup> От лат. *lamina* — пластинка, полоска.



Ламинарное течение — упорядоченный режим течения вязкой жидкости (или газа), характеризующийся отсутствием перемешивания между соседними слоями жидкости, т. е. когда слои жидкости как бы скользят относительно друг друга.

**Турбулентное (вихревое) течение** — движение с завихрениями. Вектор скорости при турбулентном движении в каждой точке беспорядочно изменяется.

**Турбулентность**<sup>1</sup> — это сложное движение жидкости (газа), хаотичное в масштабах, существенно превышающих молекулярные.



Турбулентное течение — форма течения жидкости или газа, при которой вследствие наличия в течении многочисленных вихрей различных размеров жидкие частицы (газ) совершают хаотические неустановившиеся движения по сложным траекториям.

### Контрольные вопросы

- ? Какое движение жидкости называют стационарным, а какое нестационарным?
- ? Что такое ламинарное течение жидкости или газа?
- ? Какое течение жидкости или газа называют турбулентным?

## 6.7. Уравнение Бернулли

Рассмотрим ламинарное **стационарное** (т. е. форма и расположение линий тока, а также значения скоростей в каждой точке со временем не изменяются) течение несжимаемой (идеальной) жидкости внутри узкой трубки тока, ограниченной поперечными сечениями  $\Delta S_1$  и  $\Delta S_2$  (рис. 77). Пусть в сечении  $\Delta S_1$  скорость жидкости  $v_1$ , а в сечении  $\Delta S_2$  скорость  $v_2$ . За промежуток времени  $\Delta t$  рассматриваемый объем сместится на расстояние  $v_1 \Delta t$  в сечении  $\Delta S_1$  и на расстояние  $v_2 \Delta t$  в сечении  $\Delta S_2$ . Так как по предположению жидкость несжимаема, то при перемещении ее объем не изменяется:

$$\Delta V = v_1 \Delta t \Delta S_1 = v_2 \Delta t \Delta S_2 \quad (158)$$

или

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{\Delta S_1}{\Delta S_2}. \quad (159)$$

<sup>1</sup> От лат. *turbulentus* — бурный, беспорядочный.

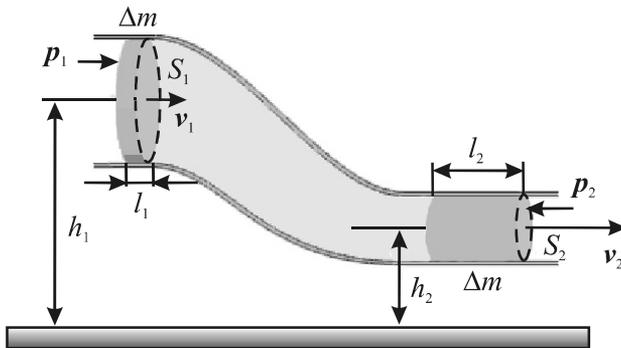


Рис. 77. Течение идеальной жидкости по трубе переменного сечения.  $\Delta V_1 = l_1 S_1$  ;  $\Delta V_2 = l_2 S_2$ . Условие несжимаемости  $\Delta V_1 = \Delta V_2 = \Delta V$



Скорость течения несжимаемой жидкости обратно пропорциональна площади поперечного сечения трубки тока; в разных сечениях скорости относятся как обратные значения сечений.

Изменение энергии рассмотренного объема равняется совершенной над ним работе внешних сил. Внешними силами являются силы давления со стороны остальной части жидкости. Изменение положения объема за время  $\Delta t$  определяется тем, что объем  $\Delta V_1 = \Delta S_1 v_1 \Delta t$  при ламинарном течении несжимаемой жидкости перешел в равный ему объем  $\Delta V_2 = \Delta S_2 v_2 \Delta t$ ; массы этих объемов  $\Delta m$  равны, т. к. жидкость несжимаема, а, следовательно, плотность жидкости всюду одинакова:

$$\Delta m = \rho \Delta V_1 = \rho \Delta V_2 . \tag{160}$$

Разность энергий объемов  $\Delta V_1$  и  $\Delta V_2$  равна работе  $\Delta A$  внешних сил. Так как полная энергия складывается из кинетической и потенциальной энергий, то можно написать:

$$(E_{K2} + E_{П2}) - (E_{K1} + E_{П1}) = \Delta m \left[ \frac{v_2^2}{2} + gh_2 - \left( \frac{v_1^2}{2} + gh_1 \right) \right] = \Delta A , \tag{161}$$

где  $h_1$  и  $h_2$  — высоты, занимаемые объемами  $\Delta V_1$  и  $\Delta V_2$  над некоторым произвольно выбранным уровнем.

Если давления в первом и втором сечениях равны  $p_1$  и  $p_2$  соответственно, то  $\Delta A = p_1 \Delta S_1 v_1 \Delta t - p_2 \Delta S_2 v_2 \Delta t$  (работа внешних сил во втором сечении отри-

цательна, т. к. силы давления противоположны направлению скорости). Поэтому:

$$\Delta m \left[ \frac{v_2^2}{2} + gh_2 - \left( \frac{v_1^2}{2} + gh_1 \right) \right] = p_1 \Delta S_1 v_1 \Delta t - p_2 \Delta S_2 v_2 \Delta t. \quad (162)$$

Подставляя в (162) выражение для  $\Delta m$  из (160), сокращая на  $\Delta S_1 v_1 \Delta t = \Delta S_2 v_2 \Delta t$  и перенося члены для первого объема влево, а члены для второго объема направо, получим:

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + \rho gh_1 + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho gh_2 + p_2. \quad (163)$$

Если  $h_1 = h_2$  (труба горизонтальная), то:

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + p_2. \quad (164)$$

Поскольку выбор сечений был произвольным, сумма величин  $\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + p$  остается постоянной в любом сечении:

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + p = \text{const}. \quad (165)$$

Зависимость давления идеальной жидкости от скорости ее течения в математической форме была впервые установлена швейцарским ученым Даниилом Бернулли (Daniel Bernoulli, 1700—1782 гг.) в 1726—1738 гг.




---

**Уравнение Бернулли** (163) связывает скорость  $v$  и давление  $p$  в ламинарном потоке идеальной несжимаемой жидкости: при установившемся течении давление в текущей жидкости больше там, где меньше ее скорость. Уравнение Бернулли выражает *закон сохранения энергии движущейся жидкости*.

---

Пусть жидкость налита в широкий сосуд, в котором внизу, в боковой стенке, находится отверстие на расстоянии  $h$  от свободной поверхности жидкости (рис. 78). Если сосуд широкий, а отверстие небольшое, то изменением  $h$  за время вытекания жидкости можно пренебречь. Можно также приближенно считать, что скорость течения жидкости в верхнем сечении равна нулю.

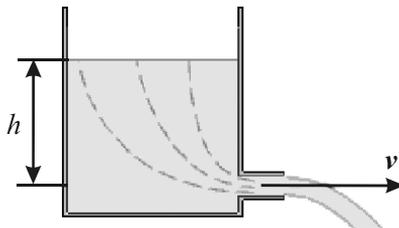


Рис. 78. Истечение жидкости из широкого сосуда

Давления в обоих сечениях одинаковы (и равны атмосферному давлению). Уравнение Бернулли в этом частном случае упрощается:

$$\rho gh = \frac{\rho v^2}{2}, \quad (166)$$

откуда следует, что:

$$v = \sqrt{2gh}, \quad (167)$$

т. е. жидкость вытекает со скоростью свободного падения с высоты  $h$  (**теорема Торричелли**<sup>1</sup>).

Пусть жидкость течет по горизонтальной трубе, в которой сечение суживается, тогда  $h = \text{const}$  и

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + p_2 = \text{const}. \quad (168)$$

Скорость течения в узком месте больше (159), поэтому по (165) давление в нем меньше (рис. 79). На этом свойстве основано устройство струйного насоса. В **струйном насосе** жидкость (газ) перемещается, увлекаемая потоком (струей) жидкой или газообразной среды. В зависимости от вида струи различают жидкоструйные (например, водоструйные), газо- и пароструйные насосы. КПД до 40%.

Закон Бернулли применяется при расчетах в энергетике кровообращения.

☞ Осенью 1912 г. океанский пароход "Олимпик" шел в открытом море; параллельно "Олимпику" следовал броненосный крейсер "Гаук". Внезапно "Гаук" свернул с курса и, не повинаясь рулю, устремился к океанскому лайнеру. Произошло столкновение, т. к. в быстром потоке воды между кораблями уменьшилось давление в соответствии с уравнением Бернулли. Морской суд не знал об уравнении Бернулли, и виновником столкновения признали капитана "Олимпика". ☐

<sup>1</sup> Эванджелиста Торричелли (Torricelli, 1608—1647 гг.) — итальянский физик и математик, ученик Галилея.

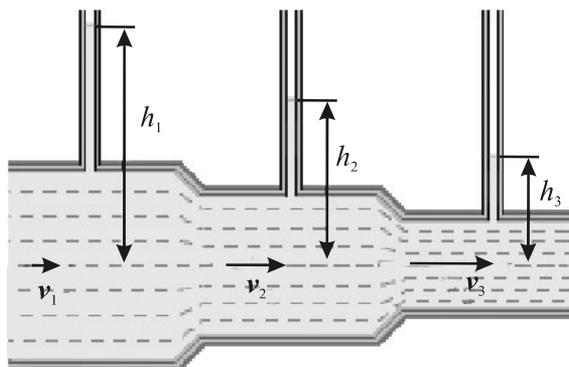


Рис. 79. Изменение давления в потоке жидкости.  $v_1 < v_2 < v_3$ ;  $h_1 > h_2 > h_3$

В отличие от жидкостей, газы могут сильно изменять свой объем. Расчеты показывают, что сжимаемостью газов можно пренебречь, если наибольшие скорости в потоке малы по сравнению со скоростью звука в этом газе.

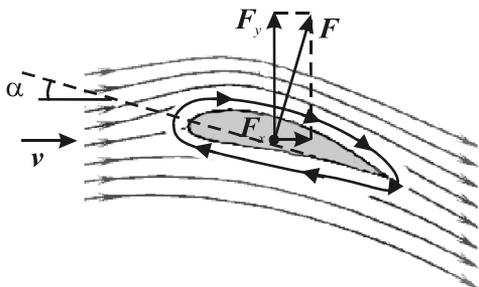


Уравнение Бернулли можно применять к достаточно широкому классу задач аэродинамики.

Одной из таких задач является изучение сил, действующих на крыло самолета. Строгое теоретическое решение этой задачи чрезвычайно сложно, и обычно для исследования сил применяются экспериментальные методы. Уравнение Бернулли позволяет дать лишь качественное объяснение возникновению подъемной силы крыла.

Из-за специального профиля крыла и наличия **угла атаки**, т. е. угла наклона крыла по отношению к набегающему потоку воздуха, скорость воздушного потока над крылом оказывается больше, чем под крылом (рис. 80). Из уравнения Бернулли следует, что давление в нижней части крыла будет больше, чем в верхней; в результате появляется сила  $F$ , действующая на крыло. Вертикальную составляющую  $F_y$  этой силы называют **подъемной силой**. Подъемная сила удерживает летящий самолет в воздухе. Горизонтальная составляющая  $F_x$  представляет собой силу сопротивления среды.

Основанная работами Бернулли и его современника Эйлера аэродинамика широкое практическое применение получила в конце XIX и начале XX вв. в результате работ русских ученых Николая Егоровича Жуковского (1847—1921 гг.) и Сергея Алексеевича Чаплыгина (1869—1942 гг.). Жуковскому первому удалось объяснить механизм подъемной силы, создаваемой крылом летательного аппарата при движении.



**Рис. 80.** Линии тока при обтекании крыла самолета и возникновение подъемной силы.  $\alpha$  — угол атаки

На основе этой качественной картины Жуковский разработал количественные методы расчета величины подъемной силы для различных профилей крыла (профили Жуковского). При скоростях полета современных скоростных самолетов воздух уже нельзя считать несжимаемым. Методы учета сжимаемости воздуха, применяемые для современных расчетов, были разработаны Чаплыгиным в 1903 г. Эстафету Жуковского и Чаплыгина подхватили сотрудники знаменитого ЦАГИ<sup>1</sup>, чьи разработки и сегодня позволяют создавать лучшие в мире аэродинамические схемы самолетов.

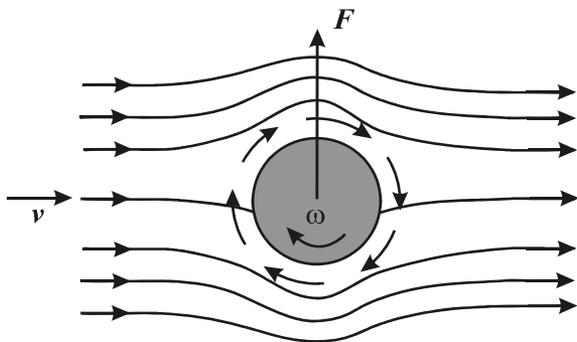
Жуковский показал, что существенную роль при обтекании крыла играют силы *вязкого трения* в поверхностном слое. В результате их действия возникает круговое движение (циркуляция) воздуха вокруг крыла. В верхней части крыла скорость циркулирующего воздуха складывается со скоростью набегающего потока, в нижней части эти скорости направлены в противоположные стороны. Это и приводит к возникновению разности давлений и появлению подъемной силы.

Интересно сравнить различные формы спускаемых аппаратов космического корабля "Восток" и более позднего "Союза": первый имел сферическую форму, второй по форме напоминает фару. Такая форма при определенном расположении *центра тяжести* спускаемого аппарата обеспечивает аэродинамическую подъемную силу при спуске в атмосфере. Ее величина регулируется разворотом аппарата вдоль продольной оси. Такой управляемый спуск помимо более точной посадки позволяет существенно снизить *перегрузки* на траектории спуска (с 9—10 до 3—4 единиц).

Циркуляция воздуха, обусловленная силами вязкого трения, возникает и вокруг вращающегося тела (например, цилиндра). При вращении цилиндр увлекает прилегающие слои воздуха, вызывая его циркуляцию. Если такой цилиндр установить в набегающем потоке воздуха, то возникнет сила бокового давления, аналогичная подъемной силе крыла самолета (рис. 81). Это явление

<sup>1</sup> Центральный аэрогидродинамический институт им. Н. Е. Жуковского.

называют **эффектом Магнуса** (открыт немецким физиком Генрихом Густавом Магнусом (Magnus, 1802—1870 гг.) в 1852 г.). Эффект Магнуса проявляется, например, при полете закрученного мяча при игре в волейбол, футбол или теннис.



**Рис. 81.** Обтекание вращающегося цилиндра набегающим потоком воздуха (эффект Магнуса)

### Контрольные вопросы

- ? В чем состоит суть уравнения Бернулли?
- ? Как записывается уравнение Бернулли?
- ? Можно ли выдуть из воронки вложенный бумажный фильтр, продувая воздух через ее узкий конец?
- ? Покажите, что состояние ровной поверхности моря, когда над ней дует равномерно ветер, является неустойчивым: случайно появившиеся на поверхности возмущения — впадины и гребни — нарастают.
- ? Вентилятор прогоняет воздух через отверстие в стене. Во сколько раз надо увеличить его мощность, чтобы вдвое увеличить приток воздуха в помещение?
- ? Сделав пояснительный рисунок, объясните возникновение подъемной силы крыла самолета.
- ? Объясните, в чем заключается эффект Магнуса.

## 6.8. Вязкое трение; вязкость

**Вязкость** или **внутреннее трение** — свойство текучих тел оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой.



При сухом трении может возникнуть сила трения покоя, при вязком — силы трения покоя нет.

Вязкость присуща всем реальным жидкостям и газам в большей или меньшей степени. Вязкость проявляется в том, что возникшее в жидкости или газе движение после прекращения действия причин, его вызвавших, постепенно прекращается.

При *ламинарном течении* среды вязкость проявляется в том, что при сдвиге соседних слоев среды относительно друг друга возникает сила противодействия — напряжение сдвига, которое для обычных сред пропорционально скорости относительного сдвига слоев (**гипотеза Ньютона**).

Пусть в жидкость погружены две параллельные друг другу пластины, линейные размеры которых значительно превосходят расстояние между ними ( $d$ ) (рис. 82). Нижняя пластина удерживается на месте, верхняя приводится в движение относительно нижней с некоторой скоростью  $v_0$ . Из опыта следует, что для перемещения верхней пластины с постоянной скоростью  $v_0$  необходимо действовать на нее с вполне определенной постоянной по модулю силой  $F$ . Раз пластина не получает ускорения, значит, действие этой силы уравновешивается равной ей по модулю противоположно направленной силой, которая, очевидно, есть сила трения, действующая на пластину при ее движении в жидкости. Обозначим ее  $F_{mp}$ .

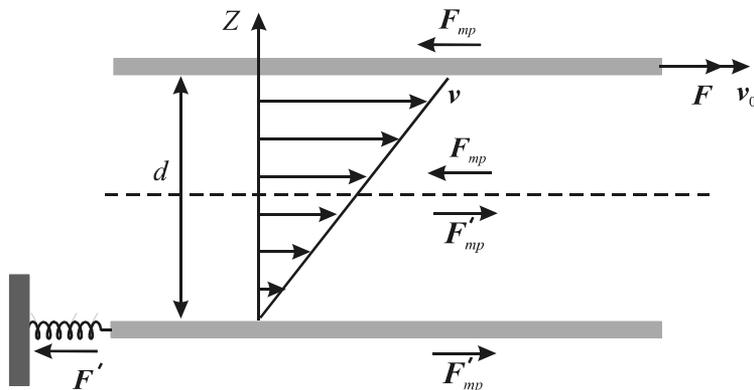


Рис. 82. Схема сил внутреннего трения в вязкой жидкости

Варьируя скорость пластины, площадь пластин  $S$  и расстояние между ними, можно получить **основной закон вязкого трения (формула Ньютона)**:

$$F = \eta \frac{dv}{dx} S, \tag{169}$$

где  $F$  — касательная (тангенциальная) сила, вызывающая сдвиг слоев жидкости друг относительно друга;  $S$  — площадь слоя, по которому происходит сдвиг;  $\frac{dv}{dx} = \frac{v_2 - v_1}{x_2 - x_1}$  — изменение скорости течения от слоя к слою (**градиент**

скорости течения), иначе — **скорость сдвига**;  $\eta$  — коэффициент пропорциональности, который называют **коэффициентом динамической вязкости** (или просто **динамической вязкостью**) и характеризует сопротивление жидкости смещению его слоев.

Основной закон вязкого течения жидкости был установлен Ньютоном в 1687 г.

Нижняя пластина при движении верхней также оказывается подверженной действию силы  $F'_{тр}$ , равной по модулю  $F_{тр}$ . Для того чтобы нижняя пластина оставалась неподвижной, эту силу необходимо уравновесить с помощью равной ей по величине и противоположно направленной силы  $F'$ .




---

При движении двух погруженных в жидкость пластин относительно друг друга между ними возникает взаимодействие.

---

Можно представить, что жидкость состоит из большого числа слоев. Воздействие пластин друг на друга осуществляется, очевидно, через жидкость, заключенную между пластинами, передаваясь от одного слоя жидкости к другому. Слой жидкости будет двигаться тем медленнее, чем дальше он находится от движущейся пластины. Если в любом месте зазора провести мысленно плоскость, параллельную пластинам (штриховая линия на рис. 82), то можно утверждать, что часть жидкости, лежащая над этой плоскостью, действует на часть жидкости, лежащую под плоскостью, с силой  $F'_{тр}$ , а часть жидкости, лежащая под плоскостью, в свою очередь действует на часть жидкости, лежащую над плоскостью, с силой  $F_{тр}$ , причем значения  $F_{тр}$  и  $F'_{тр}$  определяются формулой (169).

Формула (169) определяет не только силу трения, действующую на пластины, но и силу трения между соприкасающимися частями жидкости.

Если жидкость находится не между пластинами, а ламинарно течет по цилиндрической трубке, то скорость максимальна вдоль оси трубки и минимальна у ее стенок, так что градиент скорости становится параболическим, а не линейным.

Из формулы (169) следует, что динамическая вязкость численно равняется

тангенциальной силе, приходящейся на единицу площади:  $\eta = \frac{F}{\frac{dv}{dx} S}$  при гра-

диенте  $\frac{dv}{dx} = 1$ . В системе СИ единицей динамической вязкости служит такая вязкость, при которой градиент скорости с модулем, равным  $1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  на  $1 \text{ м}$ ,

приводит к возникновению силы внутреннего трения в 1 Н на 1 м<sup>2</sup> поверхности касания слоев. Эту единицу называют **паскаль-секундой**<sup>1</sup> (Па·с, Pa·s). 1 Па·с = 1 кг·м<sup>-1</sup>·с<sup>-1</sup>. В системе СГС единицей динамической вязкости является **пуаз**<sup>2</sup> (П, P), равный такой вязкости, при которой градиент скорости с модулем, равным 1 см·с<sup>-1</sup> на 1 см, приводит к возникновению силы внутреннего трения в 1 дин на 1 см<sup>2</sup> поверхности касания слоев. 1 П = 0,1 Н·с·м<sup>-2</sup> = 0,1 Па·с. В 1 пуазе — 100 сантипуазов (сП), 1 сП = 1 мПа·с. Единицу, равную 10<sup>-6</sup> П, называют микропуазом (мкП). Между пуазом и паскаль-секундой имеется соотношение: 1 Па·с = 10 П. Вязкость жидкостей при нормальных условиях колеблется от 10<sup>-3</sup> Па·с до единиц Па·с (табл. 17).

**Таблица 17.** Коэффициенты вязкости некоторых газов и жидкостей при давлении 1 атм и температуре 20 °С [4]

Вещество	Коэффициент вязкости $\eta$ , Па·с
Азот N <sub>2</sub>	174·10 <sup>-7</sup>
Вода H <sub>2</sub> O	1,002·10 <sup>-3</sup>
Водород H <sub>2</sub>	88·10 <sup>-7</sup>
Водяной пар H <sub>2</sub> O	128·10 <sup>-7</sup>
Воздух	181·10 <sup>-7</sup>
Глицерин C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	1495,0·10 <sup>-3</sup>
Лава текущая	10 <sup>3</sup>
Мантия земная <sup>3</sup>	10 <sup>20</sup>
Масло касторовое	950·10 <sup>-3</sup>
Масло оливковое	8400·10 <sup>-3</sup>
Масло трансформаторное	1,98·10 <sup>-3</sup>
Нефть	0,1—10
Сероуглерод CS <sub>2</sub>	0,38·10 <sup>-3</sup>
Толуол C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	0,61·10 <sup>-3</sup>

<sup>1</sup> Паскалем называют единицу давления в СИ (1 Па = 1 Н·м<sup>-2</sup>).

<sup>2</sup> Назван в честь французского физика Жана Луи Мари Пуазейля (Jean Poiseuille, 1799—1869 гг.).

<sup>3</sup> В 1935 г., рассматривая мантию как вязкую жидкость, Хаскел установил, что в геологических масштабах времени мантия ведет себя как жидкость.

Отношение коэффициента динамической вязкости к плотности среды называют **кинематическим коэффициентом вязкости** или **кинематической вязкостью**:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}, \quad (170)$$

где  $\eta$  — коэффициент динамической вязкости;  $\rho$  — плотность.

Коэффициент кинематической вязкости в системе СИ измеряется в  $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ , а в СГС — в **стоксах** (Ст), названных в честь английского ученого Джорджа Габриеля Стокса (G.G. Stokes, 1819—1903 гг.):  $1 \text{ Ст} = 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ . Чаше применяется в 100 раз меньшая единица — сангистокс (сСт):  $1 \text{ сСт} = 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ .

Величину, обратную динамической вязкости,  $\Phi = 1/\eta$ , называют **текучестью**. Единица текучести в СИ —  $\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{кг}^{-1}$ .

В *газах* расстояния между молекулами существенно больше радиуса действия молекулярных сил, поэтому вязкость газов — следствие хаотичного (теплого) движения молекул, в результате которого происходит постоянный обмен между движущимися друг относительно друга слоями газа. Это приводит к переносу от слоя к слою определенного импульса, в результате чего медленные слои ускоряются, а более быстрые замедляются. Работа внешней силы  $F$ , уравновешивающей вязкое сопротивление и поддерживающей установившееся течение, полностью переходит в теплоту.

Вязкость газа не зависит от его плотности  $\rho$  (давления  $p$ ), т. к. при сжатии газа общее количество молекул, переходящих из слоя в слой, увеличивается, но зато каждая молекула менее глубоко проникает в соседний слой и переносит меньшее количество движения (**закон Максвелла**). Вязкость газов увеличивается при нагревании. Для очень разреженных газов понятие вязкости теряет смысл.

В *жидкостях*, где расстояние между молекулами много меньше, чем в газах, вязкость обусловлена в первую очередь межмолекулярным взаимодействием, ограничивающим подвижность молекул.

Вязкость жидкости зависит от химической структуры молекул. В сходных химических соединениях вязкость возрастает с возрастанием молекулярной массы.

Расплавленные металлы имеют вязкость того же порядка, что и обычные жидкости. Особыми вязкостными свойствами обладает жидкий гелий. При температуре 2,172 К он переходит в **сверхтекучее состояние**, в котором вязкость равна нулю.



В условиях установившегося *ламинарного течения* (т. е. когда жидкость или газ перемещается слоями, параллельными направлению те-

чения) при постоянной температуре  $T$  вязкость газов и большинства жидкостей — постоянная величина, не зависящая от градиента скорости. Вязкость жидкостей зависит от химического состава жидкости, температуры и давления.

---

## 6.9. Число Рейнольдса

Характер движения жидкости (ламинарное или турбулентное) зависит, как установил английский физик и инженер Осборн Рэйнольдс (Osborne Reynolds, 1842—1912 гг.), от значения безразмерной величины, называемой числом Рейнольдса.

**Число Рейнольдса**  $Re$  характеризует соотношение между свойствами инерции и вязкости жидкостей или газов:

$$Re = \frac{\rho v l}{\eta}, \quad (171)$$

где  $\rho$  — плотность жидкости (или газа);  $v$  — характерная (средняя по сечению) скорость потока;  $l$  — характерный линейный размер (размер сечения);  $\eta$  — коэффициент динамической вязкости жидкости или газа.

При малых значениях  $Re$  течение *ламинарное*, начиная с некоторого критического значения  $Re$ , течение становится *турбулентным*. Но при очень больших числах Рейнольдса, когда потери на преодоление трения относительно малы, турбулентность опять перестает играть заметную роль.




---

Для каждого вида течения существует такое критическое число Рейнольдса, что при числе Рейнольдса меньшем, чем критическое, возможно только *ламинарное* течение.

---

## 6.10. Закон Стокса

При небольших скоростях движения твердого тела в вязкой среде и небольших его размерах сила сопротивления среды  $F$  пропорциональна динамической вязкости  $\eta$ , скорости движения тела  $v$  и линейным размерам тела  $l$ :

$$F = k\eta(-v)l, \quad (172)$$

где коэффициент пропорциональности  $k$  зависит от формы тела.

Формула (172), строго говоря, справедлива лишь для случая движения твердого тела в безграничной жидкости, но может быть применима и для случаев, когда расстояние от движущегося тела до границ жидкости значительно больше размеров тела.

В частном случае движения в жидкости тел сферической формы (шаров) формула (172) преобразуется в **закон Стокса**, установленный Стоксом в 1851 г.:

$$F = -6\pi\eta r v, \quad (173)$$

где  $F$  — сила Стокса;  $r$  — радиус шара;  $v$  — скорость его движения.

Закон Стокса справедлив лишь для малых чисел Рейнольдса (см. разд. 6.9) ( $Re \ll 1$ ), т. к. получен в предположении, что:

- скорость движения шара достаточно мала, а обтекание его жидкостью является ламинарным;
- скольжение жидкости на границе соприкосновения шарика со средой отсутствует;
- шар твердый и не деформируется;
- радиус шара велик по сравнению с длиной свободного пробега молекулы жидкости.

Закон Стокса используется в коллоидной химии, молекулярной физике, метеорологии. По закону Стокса можно определить скорость осаждения мелких капель тумана, коллоидных частиц, кусочков ила и других мелких частиц. Закон Стокса применяют также для определения коэффициента вязкости очень вязких жидкостей (вискозиметрия).

✎ Рассмотрим случай падения маленького твердого шарика в вязкой среде под действием собственного веса.

На такой шарик действуют 3 силы:

- **сила тяжести**  $F_T$  (численно равная весу  $P$  шарика), направленная вниз:

$$F_T = \rho_{ш} V g = \rho_{ш} \frac{4}{3} \pi r^3 g, \quad (174)$$

где  $\rho_{ш}$  — плотность шарика;  $r$  — его радиус;  $g$  — ускорение свободного падения;  $V$  — объем шарика;

- **выталкивающая сила (сила Архимеда)**, направленная вверх:

$$F_A = -\frac{4}{3} \pi r^3 g \rho_{ж}, \quad (175)$$

где  $\rho_{ж}$  — плотность жидкости;

□ сила внутреннего трения в жидкости (сила Стокса), направленная в сторону, противоположную направлению движения шарика:

$$F = -6\pi\eta r v . \quad (176)$$

Первые две силы постоянны, третья сила пропорциональна скорости  $v$ , поэтому при достижении шариком скорости  $v_0$  выталкивающая сила и сила сопротивления в сумме уравнивают силу тяжести ( $F = F_T - F_A$ ), и, следовательно, дальше шарик движется без ускорения. В начальный момент после погружения шарика в жидкость ускорение шарика близко к *ускорению свободного падения* — шарик движется с возрастающей скоростью. При этом в соответствии с формулой (172) возрастает сила сопротивления, а значит, уменьшается ускорение. С некоторого момента времени шарик начинает двигаться равномерно (т. е.  $\frac{dv}{dt} = 0$ ) с постоянной скоростью  $v_0$ . Уравнение действующих сил для случая равномерного падения шарика со скоростью  $v_0$  запишем в виде:

$$\frac{4}{3}\pi r^3 g (\rho_{ш} - \rho_{ж}) = 6\pi\eta r v_0 . \quad (177)$$

Решая уравнение (177) относительно  $\eta$ , получим:

$$\eta = \frac{2}{9} g r^2 \frac{\rho_{ш} - \rho_{ж}}{v_0} . \quad (178)$$

Если шарик падает вдоль оси цилиндрического сосуда с радиусом  $R$ , то учет влияния стенок сосуда приводит к следующей формуле для определения *коэффициента вязкости*:

$$\eta = \frac{2}{9} g r^2 \frac{\rho_{ш} - \rho_{ж}}{v_0 (1 + 2,4 \frac{r}{R})} , \quad (179)$$

где  $g$  — ускорение свободного падения;  $\rho_{ш}$  — плотность шарика;  $\rho_{ж}$  — плотность жидкости;  $r$  — радиус шарика;  $R$  — внутренний радиус сосуда;  $v_0$  — скорость равномерного движения шарика в жидкости.

Рассмотрим, из чего складывается и как действует сопротивление воздуха на движущийся автомобиль.

Взаимодействие воздуха и автомобиля можно представить как сумму сопротивлений: профильного, индуктивного, внутреннего, а также сопротивлений трения и выступов.

Наибольший вклад (около 58%) приходится на **профильное сопротивление**, обусловленное самой формой кузова. Воздух, обтекающий автомобиль,

как бы сжимается впереди него, создавая значительное положительное давление.

**Сопротивление выступов** (13% всех потерь) связано с аэродинамическим сопротивлением выступающих деталей автомобиля (зеркала, антенны, ручки дверей и т. д.).

**Сопротивление трения** (11% всех потерь) обусловлено "прилипанием" к поверхности кузова слоев воздуха, вследствие чего поток вблизи нее теряет скорость.

**Внутреннее сопротивление** (10% всех потерь) возникает при прохождении воздуха через системы охлаждения и вентиляции.

**Индуктивное сопротивление** (8% в общем балансе) вызывается разностью давлений на верхнюю и нижнюю части кузова. В результате их взаимодействия возникает сила, отжимающая автомобиль от земли, — *подъемная*. Хотя она и уменьшает *сопротивление качению*, ее влияние на ходовые качества машины в целом отрицательно — это уменьшение силы сцепления колес с дорогой, которое влечет за собой ухудшение управляемости.

С помощью выражения

$$\text{Re} = \frac{\rho_{ж} r v}{\eta} \quad (180)$$

(где  $\rho_{ж}$  — плотность жидкости;  $r$  — радиус шара;  $v$  — скорость его *поступательного движения*;  $\eta$  — коэффициент вязкости жидкости) закон Стокса (173) преобразуется к безразмерному виду (181):

$$C_x = \frac{24}{\text{Re}}, \quad (181)$$

где  $C_x$  — коэффициент лобового сопротивления, а  $\text{Re}$  — *число Рейнольдса* (см. разд. 6.9).

**Коэффициент лобового сопротивления**  $C_x$  — безразмерная величина, характеризующая силу, которая действует на тело, движущееся в жидкости или газе:

$$C_x \equiv \frac{X_\alpha}{qS}, \quad (182)$$

где  $X_\alpha$  — сила лобового сопротивления;  $S$  — характерная площадь;  $q$  — **скоростной напор**:

$$q = \frac{\rho v^2}{2}, \quad (183)$$

где  $\rho$  — плотность среды, в которой движется тело;  $v$  — скорость тела относительно этой среды.

Коэффициент лобового сопротивления  $C_x$  зависит и от скорости (*числа Маха* — см. разд. 2.7), и от свойств среды (*числа Рейнольдса* — см. разд. 6.9), но в первую очередь зависит от формы и обтекаемости самого тела.

Коэффициент  $C_x$  определяют экспериментально, численно он равен силе сопротивления воздуха в ньютонах, создаваемой при движении автомобиля со скоростью  $1 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  ( $36 \text{ км}\cdot\text{ч}^{-1}$ ) на  $1 \text{ м}^2$  лобовой площади.

Снижение расхода топлива, пожалуй, наиболее актуальная проблема в современных автомобилестроении и авиастроении. Расход этот зависит, прежде всего, от различных сил сопротивления движению, на преодоление которых затрачивается энергия сгорания топлива. Уменьшение их — один из путей его экономии и, следовательно, рачительного природопользования.

В СССР еще в 1930-е гг. начали экспериментировать с обтекаемыми кузовами автомобилей. Примером может служить советский спортивный ГАЗ-ГЛ-1 (рис. 83) на базе ГАЗ-М1 "Эмка" (конструктор Е. В. Агитов), развивший  $147,84 \text{ км}\cdot\text{ч}^{-1}$ . Опыт конструирования обтекаемых кузовов позволил в 1944 г. создать знаменитую "Победу" (рис. 84) с оригинальной формой кузова, который оказывал очень малое аэродинамическое сопротивление ( $C_x \approx 0,31$ ). Но и ее кузов можно было улучшить — сконструированная в 1950 г. "Победа Спорт" (рис. 85) развивала скорость до  $178 \text{ км}\cdot\text{ч}^{-1}$ .

Коэффициент лобового сопротивления у легковых автомобилей, выпущенных разными фирмами в 1970-х и 1980-х гг., колебался от 0,30 до 0,60. В среднем он составлял 0,43 (среднее значение  $C_x$  у машин выпуска 1938 г. — 0,58).

Оптимальные формы самолетов, ракет, космических и подводных кораблей, а также автомобилей и поездов определяются с помощью **аэродинамических труб** — установок, создающих поток воздуха или газа для экспериментального изучения явлений, сопровождающих обтекание тел.

Прототип аэродинамической трубы был создан в 1897 г. российским ученым Константином Эдуардовичем Циолковским (1857—1935 гг.), использовавшим для опытов поток воздуха на выходе из центробежного вентилятора. В 1902 г. Н. Е. Жуковский построил аэродинамическую трубу, в которой осевым вентилятором создавался воздушный поток со скоростью до  $9 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ . Первые аэродинамические трубы разомкнутой схемы были созданы Т. Стантоном в Национальной физической лаборатории в Лондоне в 1903 г. и Жуковским в Москве в 1906 г., а первые замкнутые аэродинамические трубы —

в 1909 г. в Геттингене немецким ученым Людвигом Прандтлем (Prandtl, 1875—1953 гг.) и в 1910 г. Стантоном. Первая аэродинамическая труба со свободной струей в рабочей части была построена Эйфелем (Alexandre Gustave Eiffel, 1832—1923 гг.) в Париже в 1909 г. Дальнейшее развитие аэродинамических труб шло преимущественно по пути увеличения их размеров и повышения скорости потока в рабочей части (где помещается модель), которая является одной из основных характеристик аэродинамических труб.



Рис. 83. 1938 г. ГАЗ-ГЛ-1



Рис. 84. ГАЗ-М20 "Победа".

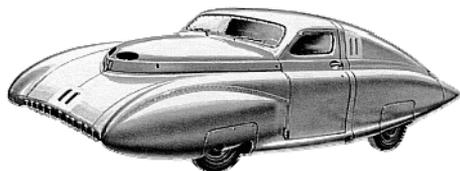


Рис. 85. "Победа Спорт".

## 6.11. Элементы гидрогеодинамики

Любая горная порода состоит из твердых минеральных зерен и пространства, не занятого ими. Если объем свободного пространства в некотором объеме породы  $V$  обозначить через  $V_n$ , то величина, равная их отношению:

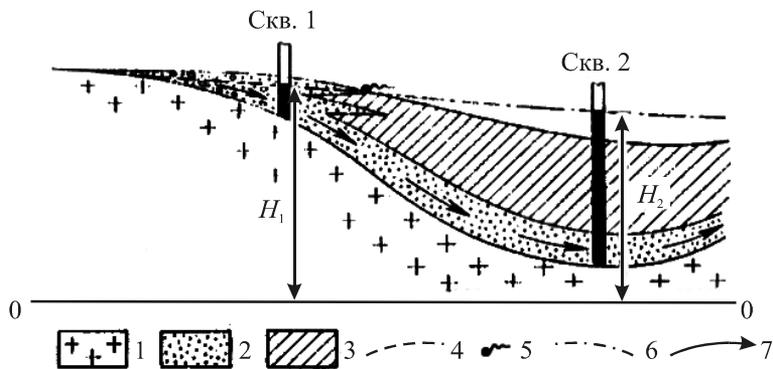
$$n = \frac{V_n}{V} \quad (184)$$

будет характеризовать **степень пустотности** горной породы.

В породах типа песков, слабосцементированных песчаников, глин, суглинков и др. свободное пространство образует поры. Для этих пород степень пустотности характеризует общую пористость. Для монолитных пород типа гранитов, базальтов, сиенитов и им подобных пустотность в основном связана с трещинами. Параметр  $n$  в этом случае отражает общую трещинную пустотность. У некоторых горных пород (трещиноватых известняков, доломитов, прочно сцементированных песчаников) возможно совместное нахождение пустот различного морфологического типа, такие породы называют **породами с двойной пустотностью**.

Рассмотрим второй элемент системы вода-порода — подземные воды. Основным объектом изучения гидрогеологов являются капельно-жидкие (гравитационные) воды.

Движение капельно-жидких вод подчинено действию гравитационных и компрессионных сил. По этим причинам движение подземных вод может идти в любом направлении — вниз, вверх, по пласту, через пласты в соответствии с направлением передачи энергии в сторону падения напоров. В верхней части разреза ведущая роль принадлежит *гравитационным силам* (рис. 86) и соответственно нисходящему движению вод. С глубиной возрастает роль компрессионных сил, и потому становится ведущим восходящее движение подземных вод.



**Рис. 86.** Формирование гидростатических напоров в водоносном горизонте:  
 1 — граниты; 2 — пески; 3 — глины; 4 — уровень подземных вод; 5 — источник (выход подземных вод на поверхность); 6 — пьезометрический уровень (уровень напоров подземных вод); 7 — направление движения подземных вод;  
 0-0 — плоскость сравнения

При движении капельно-жидкой воды различают два режима течения: ламинарный и турбулентный. *Ламинарный* (параллельно-струйный) режим наблюдается при малых скоростях течения; для него характерно движение потока отдельными, не перемешивающимися между собой струйками. *Турбу-*

лентный (вихревой) режим наблюдается при сравнительно больших скоростях течения; для него характерно активное проявление внутренней пульсации частиц потока, обуславливающее активное перемешивание между отдельными струйками (образование вихрей).

При ламинарном режиме течения сопротивление движущегося потока полностью определяется силами *вязкого трения* между отдельными струйками.

При рассмотрении системы вода-порода важное значение имеют так называемые емкостные свойства пород. Под **емкостными свойствами** понимают способность горных пород вмещать, удерживать и отдавать заключенную в них подземную воду.

Под **гравитационной водоотдачей** понимается способность горных пород отдавать заключенную в них подземную воду путем свободного стекания под действием силы тяжести. Количественным показателем гравитационной водоотдачи является коэффициент гравитационной водоотдачи:

$$\mu = \frac{V_B}{V}, \quad (185)$$

где  $V_B$  и  $V$  — объемы вытекающей воды и осушенной горной породы.

**Коэффициент гравитационной водоотдачи** показывает, какое количество подземных вод может быть получено с единицы объема осушенной горной породы. Предельное значение коэффициента гравитационной водоотдачи:

$$\mu = n_a - W_{MM}, \quad (186)$$

где  $n_a$  — активная пористость;  $W_{MM}$  — максимальная молекулярная влагоемкость.

Для горных пород, насыщенных подземными водами, величиной, аналогичной коэффициенту водоотдачи, является **коэффициент недостатка насыщения**. Этот коэффициент характеризует объем воды, необходимый для насыщения единицы объема породы. Численно коэффициент недостатка насыщения несколько меньше коэффициента водоотдачи. Предельное значение коэффициента недостатка:

$$\mu_n = n_a - W_{MM} - W_g, \quad (187)$$

где  $W_g$  — объемное относительное содержание защемленного воздуха.

Процессы осушения и насыщения горных пород протекают с конечными скоростями, и поэтому величины указанных коэффициентов изменяются во времени. В целом коэффициенты гравитационной водоотдачи и недостатка насыщения постепенно увеличиваются от некоторых относительно небольших

значений до продельных, оцениваемых зависимостями (186) и (187). Отмеченный эффект получил название "**растянутости**" водоотдачи во времени.

Под **упругой водоотдачей** понимается способность горной породы отдавать заключенную в них подземную воду за счет упругого расширения жидкости и упругого сжатия горной породы. **Коэффициент упругоёмкости пласта** характеризует объем жидкости, который может быть получен с единицы объема горной породы за счет упругих свойств как горной породы, так и воды при снижении напоров на 1 м.



# ГЛАВА 7

## Неинерциальные системы отсчета. Движение тела с переменной массой

### 7.1. Неинерциальные системы отсчета. Силы инерции

*Законы Ньютона (см. разд. 3.3) выполняются только в инерциальных системах отсчета (см. разд. 3.1). Будут ли законы ньютоновской механики выполняться в системах отсчета, движущихся с ускорением?*

Пусть имеется неподвижная ИСО, связанная с пассажирской платформой, и подвижная система, связанная с ускоренно движущимся относительно платформы вагоном электропоезда. Человек, находящийся на платформе, и пассажир вагона описывают происходящие явления с точки зрения механики Ньютона. Человек, стоящий на платформе, опишет явления, происходящие в вагоне с учетом ускорения вагона относительно платформы. Для пассажира, стоящего в вагоне, никакого ускорения этой системы не существует, т. к. она для него "неподвижна". Ему непонятно происхождение силы, пытающейся сдвинуть его с места (ведь, с его точки зрения, никаких тел, взаимодействующих с ним, кроме сцепления его подошв с "неподвижным" полом вагона, нет).

Систему отсчета, движущуюся по отношению к ИСО с ускорением, называют **неинерциальной системой отсчета (НИСО)**.

Любая НИСО движется относительно ИСО с ускорением, поэтому ускорение тела в неинерциальной системе отсчета будет отличаться от ускорения в ИСО. Для поступательно движущейся НИСО разность ускорений одинакова для всех точек пространства и представляет собой ускорение НИСО. Для вращающейся НИСО разность ускорений в разных точках пространства будет различной.

Ограничимся процессами, когда скорость системы много меньше скорости света и верны *преобразования Галилея*.

Пусть *результатирующая* всех сил, обусловленных действием на данное тело со стороны других тел, равна  $\mathbf{F}$ . Тогда, согласно *второму закону Ньютона*, (см. разд. 3.6) ускорение тела относительно любой ИСО равняется:

$$\mathbf{a}_1 - \mathbf{a}_2 = \mathbf{a} = \frac{\mathbf{F}}{m}, \quad (188)$$

где  $\mathbf{a}_1$  — ускорение тела относительно ИСО;  $\mathbf{a}_2$  — ускорение тела относительно НИСО;  $\mathbf{a}$  — ускорение ИСО относительно НИСО;  $\mathbf{F}$  — *результатирующая* всех сил, обусловленных действием на данное тело со стороны других тел;  $m$  — масса тела.

Ускорение  $\mathbf{a}_2$  можно представить в виде:

$$\mathbf{a}_2 = \mathbf{a}_1 - \mathbf{a} = \frac{\mathbf{F}}{m} - \mathbf{a}. \quad (189)$$

Отсюда следует, что даже при  $\mathbf{F} = 0$  тело будет двигаться по отношению к НИСО с ускорением  $-\mathbf{a}$ , т. е. так, как если бы на него действовала сила, равная  $-\mathbf{ma}$ .




---

При описании движения в неинерциальных системах отсчета можно пользоваться уравнениями Ньютона, если наряду с силами, обусловленными воздействием тел друг на друга, учитывать так называемые **силы инерции**  $\mathbf{F}_{in}$ , которые следует полагать равными произведению массы тела на взятую с обратным знаком разность его ускорений по отношению к инерциальной и неинерциальной системам отсчета.

---

Сила инерции — векторная величина, численно равная произведению массы  $m$  материальной точки на ее ускорение  $\mathbf{a}$  и направленная противоположно переносному ускорению НИСО:

$$\mathbf{F}_{in} = -m(\mathbf{a}_1 - \mathbf{a}_2) = -\mathbf{ma}. \quad (190)$$

Соответственно уравнение *второго закона Ньютона* (см. разд. 3.6) в НИСО будет иметь вид:

$$m\mathbf{a}_2 = \mathbf{F} + \mathbf{F}_{in}. \quad (191)$$

Введение сил инерции дает возможность описывать движение тел в любых (как инерциальных, так и неинерциальных) системах отсчета с помощью одних и тех же уравнений движения.

Характерным свойством сил инерции является их пропорциональность массе тела. Благодаря этому свойству силы инерции оказываются аналогичными *силам тяготения*.

Однако силы инерции принципиально отличаются от таких сил, как *упругие, гравитационные силы и силы трения*, т. е. от сил, обусловленных воздействием на тело со стороны других тел. Для сил инерции не выполняется *третий закон Ньютона*: для них не существует противодействующих сил, а значит, и тел воздействия. В этом смысле их можно назвать **фиктивными силами (псевдосилами)**.



---

Силы инерции неинвариантны по отношению к ускоренно движущимся системам отсчета.

Силы инерции вводятся только в ускоренно движущихся системах отсчета. Там это реальная сила, равная изменению импульса в единицу времени.

Для сил инерции нет сил противодействия, т. к. силы инерции как бы обусловлены внешним полем. Силы инерции в вертикально ускоренной системе невозможно отличить от *силы тяжести*.

---

### Контрольные вопросы

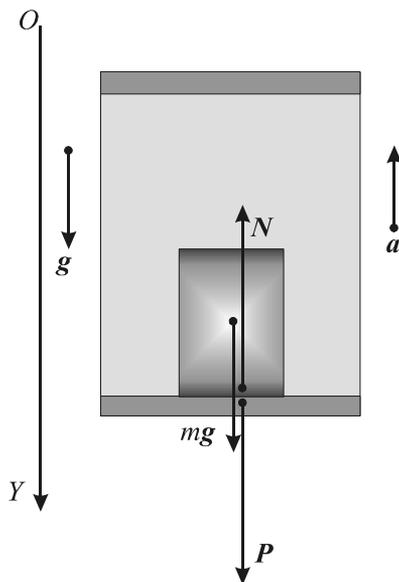
- ? Какие простейшие неинерциальные системы Вы можете назвать?
- ? Дайте определение силы инерции.

## 7.2. Перегрузки

Рассмотрим движущийся с ускорением лифт (рис. 87), как пример *неинерциальной системы отсчета*.

Если вектор ускорения  $a$  лифта направлен вертикально вверх (рис. 87), то *вес* тела массой  $m$  будет превышать по модулю *силу тяжести*. Увеличение веса тела, вызванное ускоренным движением опоры или подвеса, называют **перегрузкой**. Часто под перегрузкой понимают соотношение веса человека, двигающегося с ускорением, и веса того же человека, неподвижно стоящего на Земле.

Перегрузки обычно измеряют в числе стандартных значений *ускорения свободного падения*.



**Рис. 87.** Вес тела в лифте, движущемся с ускорением.  
Вектор ускорения  $a$  направлен вертикально вверх



В обычных условиях на человека действуют сила тяжести и сила реакции опоры. На горизонтальной опоре при отсутствии ускорения эти силы равны и противоположны по направлению. Такое состояние естественно для человека.

При ускоренном движении системы (в неинерциальной системе отсчета) могут возникнуть особые состояния, называемые перегрузками и невесомостью ( $a = g$ ).

Действие перегрузки испытывают космонавты, как при взлете космической ракеты, так и на участке торможения при входе космического корабля в плотные слои атмосферы. Большие перегрузки испытывают летчики при выполнении фигур высшего пилотажа (табл. 18).

Перегрузки могут оказывать существенное влияние на организм человека, т. к. в этих состояниях происходит отток крови, изменяется взаимное давление внутренних органов друг на друга, возникает их *деформация* и т. п. Поэтому человек способен выдерживать лишь ограниченные перегрузки.

Прибор для измерения ускорений или перегрузок называют **акселерометром**. Эти устройства применяются в *гравиметрии*, при испытаниях различных механизмов и двигателей, в виброметрии, для измерения ускорения движущихся объектов (автомобилей, летательных аппаратов и т. п.).

Таблица 18. Уровни перегрузок [1]

Пример		Перегрузка, $g$
Кратковременная перегрузка, которую выдерживает тренированный человек в направлении	от спины к груди	до 30
	от головы к ногам	до 20
	от ног к голове	до 8
Длительная перегрузка — предел выносливости человека		8
Пассажир в самолете		до 1,5
Парашютист при раскрытии парашюта при падении со скоростью	$30 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$	1,8
	$40 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$	3,3
	$50 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$	5,2
Летчик в спортивном или военном самолете	в полете	2—8
	при катапультировании	до 16
Космонавт при старте и посадке космического корабля	"Восток"	8—10
	"Союз"	3—4
Водитель гоночного автомобиля		до 4
Пассажир в автомобиле при столкновении на скорости	$50 \text{ км}\cdot\text{ч}^{-1}$	до 40—60
	$70 \text{ км}\cdot\text{ч}^{-1}$	до 50—80

По назначению акселерометры бывают линейными и максимальными. **Линейные акселерометры** измеряют ускорение как функцию времени, а **максимальные акселерометры** измеряют время достижения заданным объектом максимального или заданного значения ускорения в кратковременном процессе (например, при ударе). Максимальные акселерометры позволяют измерять ускорения от  $1 \text{ см}\cdot\text{с}^{-2}$  до  $3\cdot 10^4 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$  ( $0,001g$  —  $3000g$ ).

В зависимости от вида движения акселерометры бывают линейными и угловыми. В случае если акселерометр снабжен записывающим устройством, его называют **акселерографом**.

В линейном **механическом акселерометре** ускорение воспринимается маятниковым устройством, в котором под действием ускорения происходит отклонение маятника (см. том "*Колебания и волны*" данного курса) от положения равновесия, фиксируемое отклонением стрелки измерительного прибора. Механические акселерометры применяются при больших значениях ускорений.

В **электромеханическом акселерометре** измерение производится, например, с помощью пьезодатчика (см. том "*Электричество*" данного курса), ко-

торый изменяет свои электрические параметры в зависимости от механической деформации, зависящей от ускорения.

В **емкостных акселерометрах** используется микрогрузик (массой 1 мкг) в виде гребенки, подвешенной на упругих элементах. В **термоконвекционных акселерометрах** (рис. 88) "грузиком" является газ (воздух). Внутри акселерометра в центре каверны расположен нагревательный элемент. Вокруг него с четырех сторон (по двум осям) расположены термодатчики, измеряющие распределение температуры, создаваемое конвекционным потоком воздуха (рис. 88, (а)). Если ускорения отсутствуют, распределение симметрично относительно вертикальной оси (рис. 88, (б)). В случае наличия ускорения распределение смещается, и термодатчики фиксируют это (рис. 88, (в)).

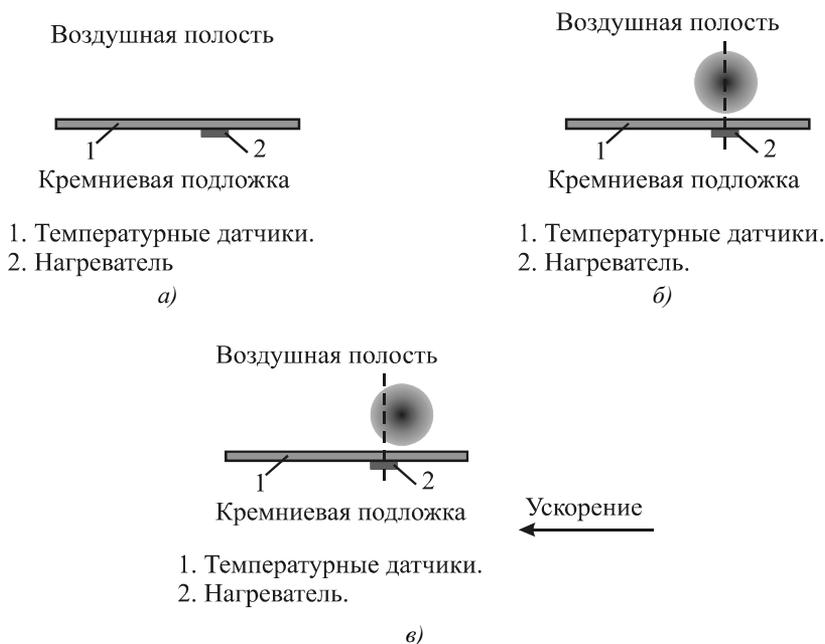


Рис. 88. Схема и устройство термоконвекционного акселерометра

### Контрольные вопросы

- ? Что такое перегрузка?
- ? Какие бывают акселерометры?

### 7.3. Центробежная сила инерции

Перейдем к равномерно вращающейся системе отсчета. Рассмотрим в качестве примера вращающейся системы отсчета диск, равномерно вращающийся вокруг вертикальной неподвижной оси с угловой скоростью  $\omega$ , и рассмотрим на нем простейшее движение — равномерно движущуюся вдоль края диска по направлению вращения диска частицу. Обозначим скорость этой частицы относительно диска как  $v_H$ . Скорость этой же частицы относительно ИСО (неподвижного наблюдателя)  $v_I$  будет равна сумме  $v_H$  и скорости точек края диска:

$$v_I = v_H + \omega R, \quad (192)$$

где  $\omega R$  — скорость точек края диска;  $R$  — радиус диска.

Так как частица равномерно движется по окружности радиуса  $R$  со скоростью  $v_I$ , то ускорение частицы по отношению к ИСО будет:

$$a_I = \frac{v_I^2}{R} = \frac{v_H^2}{R} + 2\omega v_H + \omega^2 R. \quad (193)$$

Умножив это ускорение на массу частицы  $m$ , можно найти силу  $F$ , действующую на частицу в инерциальной системе отсчета:

$$F = ma_I. \quad (194)$$

А как это движение будет видеть наблюдатель, находящийся на том же диске? Для него частица равномерно движется по окружности радиуса  $R$  со скоростью  $v_H$ . Поэтому ускорение частицы относительно диска будет равно

$$a_H = \frac{v_H^2}{R} \quad (195)$$

и направлено к центру диска. Считая диск неподвижным, этот наблюдатель в соответствии со *вторым законом Ньютона* домножит ускорение  $a_H$  на массу частицы  $m$  и получит силу  $F_H$ , действующую на частицу "с его точки зрения":

$$F_H = ma_H. \quad (196)$$

Учитывая (193), (194) и (195), получим:

$$F_H = F - 2m\omega v_H - m\omega^2 R. \quad (197)$$

где  $R$  — расстояние от центра.



По отношению к вращающейся системе отсчета на частицу помимо "истинной" силы  $F$ , направленной к центру, действуют две добавочные силы:  $-2m\omega v_H$  и  $-m\omega^2 R$ . Первую из этих сил называют *силой Кориолиса*, а вторую — **центробежной силой инерции**. Знаки "минус" показывают, что обе силы направлены от оси вращения диска.

Центробежная сила инерции  $F_{цб}$ :

$$F_{цб} = m\omega^2 R, \quad (198)$$

где  $\omega$  — величина угловой скорости;  $R$  — расстояние от центра вращения.



Центробежная сила инерции  $F_{цб}$  — *фиктивная сила*, возникающая во вращающейся (по отношению к инерциальным системам) системе отсчета. Вводить центробежную силу инерции можно только тогда, когда движение рассматривается во вращающейся системе отсчета. Эта сила действует на тело во вращающейся системе отсчета независимо от того, покоится тело в этой системе или движется относительно нее.

Следует различать центробежную силу инерции (фиктивную силу) и центробежную силу (силу реакции).

**Центробежная сила** — сила реакции, с которой движущаяся материальная точка действует на тело (связь), стесняющее свободу движения точки и вынуждающее ее двигаться криволинейно.

Численно центробежная сила равна:

$$F = \frac{mv^2}{R}, \quad (199)$$

где  $m$  — масса точки;  $v$  — ее скорость;  $R$  — радиус кривизны траектории.

Центробежная сила направлена по нормали к траектории от центра кривизны (при движении точки по окружности — от центра окружности вдоль радиуса).

**Центростремительная сила** — сила, действующая на материальную точку и направленная по нормали к ее траектории в сторону центра кривизны (к центру окружности при движении точки по окружности).

Численно центростремительная сила равна центробежной силе. Под действием центростремительной силы материальная точка движется криволинейно. При прямолинейном движении центростремительная сила равна нулю.



Центробежная и центростремительная силы численно равны друг другу и направлены вдоль одной прямой в противоположные стороны, но приложены к разным телам.

При вращении в горизонтальной плоскости привязанного к веревке груза центростремительная сила действует со стороны веревки на груз, вынуждая его двигаться по окружности, а центробежная сила действует со стороны груза на веревку, натягивая ее. Центробежная и центростремительная силы всегда приложены к разным телам. Обе они являются не фиктивными силами, а "настоящими силами", т. к. возникают в результате взаимодействия тел. При этом не следует забывать, что во вращающейся вместе с телом системе отсчета тело покоится. □

### Контрольные вопросы

- ? Когда возникает центробежная сила инерции? Назовите ее величину и направление.
- ? Как Вы понимаете различие между центробежной силой инерции и центробежной силой?
- ? Что такое центростремительная сила?

## 7.4. Зависимость веса тела от широты местности

При точном решении задач о движении тел относительно земной поверхности нужно учитывать *центробежную силу инерции* (198), равную  $m\omega^2 R$ , где  $m$  — масса тела,  $\omega$  — угловая скорость вращения Земли вокруг ее оси, а  $R$  — расстояние тела от земной оси (рис. 89).

Угловая скорость вращения Земли  $\omega$  равна:

$$\omega = \frac{2\pi}{86400} \approx 7,3 \cdot 10^{-5} \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}. \quad (200)$$

Если считать Землю идеальным шаром, то, в случаях, когда высота тел над поверхностью Земли невелика, можно положить  $R$  равным  $R_3 \cos \varphi$  (где  $R_3$  — радиус Земли, а  $\varphi$  — широта местности). Тогда выражение для *центробежной силы инерции* примет вид:

$$F_{цб} = m\omega^2 R_3 \cos \varphi. \quad (201)$$

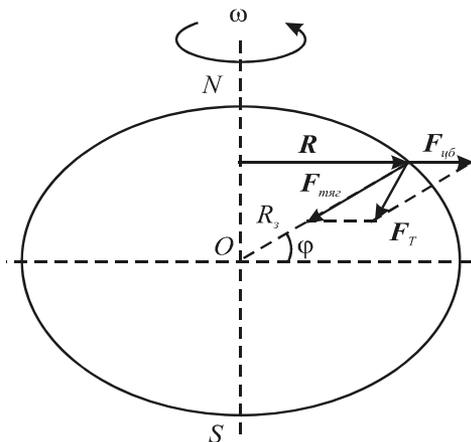


Рис. 89. Учет центробежной силы инерции

Наблюдаемое относительно Земли ускорение свободного падения тел  $g$  обусловлено действием двух сил: силы тяготения  $F_{тяг}$ , с которой тело притягивается Землей, и силы  $F_{цб}$ . Результирующая этих сил есть *сила тяжести*, равная  $mg$ .

Отличие силы тяжести от силы тяготения невелико, т. к. *центробежная сила инерции* значительно меньше силы тяготения (отношение максимального значения ускорения центробежной силы инерции (на экваторе) к минимальному значению ускорения притяжения составляет  $1/288$ ). Примем Землю за вращающийся шар (в действительности Земля представляет собой эллипсоид вращения с весьма малым коэффициентом сжатия) и вычислим зависимость ускорения свободного падения  $g$  от географической широты  $\varphi$ :

$$g^2 = \left( \frac{G \cdot M}{R_3^2} \right)^2 - 2 \frac{GM}{R_3^2} \omega^2 R_3 \cos \varphi + \left( \omega^2 R_3 \cos \varphi \right)^2, \quad (202)$$

откуда:

$$g \approx \frac{GM}{R_3^2} \left( 1 - \frac{\omega^2 R_3}{GM} \cos^2 \varphi \right). \quad (203)$$

Полагая приближенно:

$$R_3 \approx 6,4 \cdot 10^8 \text{ см}, \quad \frac{GM}{R_3^2} \approx 980 \text{ см} \cdot \text{с}^{-2}, \quad \frac{\omega^2 R_3}{GM} \approx 0,0033,$$

получим:

$$g \approx 980(1 - 0,0033 \cos^2 \varphi) \text{ см} \cdot \text{с}^{-2}. \quad (204)$$

Выражение (204) не является точным представлением действительного широтного хода силы тяжести. Отличия возникают из-за приближенного характера использованной формулы и отклонения формы Земли от сферической.

С учетом высоты  $H$  над уровнем моря для вычисления  $g$  используется приближенная формула:

$$g \approx 978,0318(1 + 0,05302 \sin \varphi - 0,000006 \sin^2 2\varphi) - 0,0003086H \text{ (см} \cdot \text{с}^{-2}\text{)}. \quad (205)$$

Направление силы тяжести не перпендикулярно поверхности. Угол наклона  $\theta$  можно вычислить из соотношения:

$$\theta = \frac{f \sin \varphi}{g} = \frac{1}{2} \frac{\omega^2 R_3}{g} \sin^2 \varphi. \quad (206)$$

При  $\varphi = 45^\circ$  угол наклона  $\theta$  принимает максимальное значение (около  $6'$ ).

Направление силы тяжести совпадает с направлением нити, натянутой грузом, которое называют **направлением отвеса** или **вертикальным направлением**. Получается, что вертикаль направлена к центру Земли только на полюсах и на экваторе.




---

Направление силы тяжести и направление к *центру масс* Земли различны (от 0 на экваторе и на полюсах до почти  $6'$  на широте  $45^\circ$ ).

---

Разность между силой притяжения к Земле и силой тяжести равна нулю на полюсах и достигает максимума, равного 0,3% силы тяжести, на экваторе. Вследствие своего вращения Земля имеет слегка сплюснутую форму вдоль оси вращения, так что экваториальный радиус нашей планеты на 21 км больше, чем полярный. Так как сила притяжения обратно пропорциональна квадрату расстояния, то она закономерно уменьшается от полюсов к экватору, будучи на экваторе примерно на 0,2% меньше, чем у полюсов. В итоге, ускорение свободного падения изменяется с широтой в пределах от  $9,78030 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$  на экваторе до  $9,83216 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$  на полюсах (табл. 19). Значение  $9,80665 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$  принято в качестве стандартного (нормального) значения.




---

Сила тяжести на поверхности Земли является суммой силы притяжения, направленной к *центру масс* Земли, и центробежной силы инерции, направленной перпендикулярно оси вращения Земли.

---

**Таблица 19.** Напряженность земного поля тяготения (ускорение свободного падения) для разных широт на уровне моря

Широта	Ускорение свободного падения $g$ , $\text{м}\cdot\text{с}^{-2}$
0° (экватор)	9,78030
10°	9,78186
20°	9,78634
30°	9,79321
40°	9,80166
<b>стандартное (нормальное) значение</b>	9,80665
50°	9,81066
59°57' (Санкт-Петербург)	9,81908
70°	9,82606
80°	9,83058
90° (полюса)	9,83216

### Контрольные вопросы

- ? Докажите, что ускорение свободного падения зависит от широты местности, даже если считать Землю правильным шаром.
- ? Как сказалось действие центробежной силы инерции на формировании планеты Земля? Сделайте чертеж.

## 7.5. Центрифуги и их применение в научных исследованиях

**Центрифуга** — установка, создающая высокое *нормальное ускорение*, основная рабочая часть — быстро вращающийся вокруг неподвижной оси ротор.

Центрифуги применяются для разделения неоднородных смесей (суспензий, эмульсий, шламов) на составные части под действием центробежной силы инерции (**центрифугирование**). В промышленности и науке центрифуги используются для осветления загрязненных жидкостей, гидравлической классификации шламов по крупности твердых частиц и т. д. Возможности разделения увеличиваются с возрастанием частоты вращения ротора центрифуги.

**Ультрацентрифуга** — устройство для создания с помощью вращающегося ротора центробежных сил, значительно превосходящих силу земного тяготе-

ния (в сотни тысяч раз). Лабораторную ультрацентрифугу применяют для изучения седиментации, разделения частиц размером менее 100 нм (коллоидных систем, молекул белков, нуклеиновых кислот, синтетических полимеров). Первую ультрацентрифугу<sup>1</sup> изобрел и изготовил в 1923 г. Теодор Свэдберг (Theodore Svedberg, 1884—1971 гг.).

Высокоскоростное центрифугирование газов применяют для разделения изотопов тяжелых металлов (например, урана). Первая в мире промышленная газовая центрифуга для разделения изотопов урана была создана в 1954 г. на Кировском заводе в Ленинграде.

В биологии часто пользуются центрифугой (и ультрацентрифугой) для разделения и последующего исследования макромолекул или различных суспензий. Ротор таких центрифуг вращается со скоростью от нескольких тысяч до десятков тысяч оборотов в минуту, а величины нормального ускорения превышают  $10^6 g$ .

При подготовке космонавтов центрифуга используется как устройство, имитирующее длительное действие ускорения (перегрузок). Большой радиус установки (до 15 м и более) и мощность двигателей (несколько МВт) позволяет создавать ускорения до  $400 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$  (т. е. до  $40g$ ).

Центрифуги используются для лечения гипертонии и других заболеваний. С помощью центрифуги, используемой для проверки вестибулярного аппарата космонавтов, у пациента перераспределяется давление крови в организме человека, и за счет этого лечатся десятки заболеваний.

## 7.6. Сила Кориолиса

Рассмотрим горизонтально расположенный диск, который может вращаться вокруг вертикальной оси. Запустим шарик со скоростью  $\mathbf{u}$  вдоль радиуса. Если диск не вращается, шарик будет катиться вдоль радиуса. Если же диск привести во вращение, то шарик отклонится от радиуса так, как если бы на него действовала сила  $\mathbf{F}_K$ , перпендикулярная к скорости  $\mathbf{u}$ .

С точки зрения наблюдателя, находящегося вне вращающегося диска, шарик стремится сохранить постоянную скорость  $\mathbf{u}$ , а диск уходит из-под него.

С точки зрения наблюдателя, находящегося на диске, если диск покоится, то шарик катится по радиусу. Если же диск вращается со скоростью  $\omega$ , то шарик катится по криволинейной траектории, т. к. на него действует сила, направленная перпендикулярно скорости  $\mathbf{u}$ .

---

<sup>1</sup> Обеспечивала ускорение  $5 \cdot 10^3 g$ .



Во вращающейся системе отсчета движущееся тело (шарик) будет или отклоняться по направлению, перпендикулярному к его относительной скорости, или оказывать давление на связь, препятствующую такому отклонению.

---

Следовательно, при движении тела во вращающейся системе отсчета, кроме *центробежной силы инерции*, действует еще одна сила, называемая **силой Кориолиса**<sup>1</sup> или **кориолисовой силой инерции**: сила инерции, действующая на движущееся тело в неинерциальной системе отсчета и обусловленная кориолисовым ускорением.

Сила Кориолиса по своему характеру отличается от рассмотренных ранее сил. Она действует только на движущееся (в НИСО) тело и зависит от скорости этого движения. В то же время эта сила не зависит от положения тела относительно системы отсчета.

Сила Кориолиса  $F_K$  численно равняется произведению массы тела  $m$  на его кориолисово ускорение  $w_K$ :

$$F_K = mw_K. \quad (207)$$

**Кориолисово ускорение (ускорение Кориолиса)  $w_K$**  — составляющая абсолютного ускорения точки, обусловленная ее перемещением из области с одной *переносной скоростью* (скоростью подвижной системы отсчета) в область с другой *переносной скоростью*:

$$w_K = 2[\mathbf{u} \omega], \quad (208)$$

$$F_K = 2m[\mathbf{u} \omega]. \quad (209)$$

Сила Кориолиса действует на тело, движущееся во вращающейся системе отсчета. Ее направление определяется как направление векторного произведения скорости тела во вращающейся системе и угловой скорости вращения самой системы — перпендикулярно плоскости, в которой лежат угловая скорость и скорость тела.



Сила Кориолиса — одна из сил инерции, прибавлением которой к действующим на материальную точку физическим силам учитывается влияние вращения подвижной системы отсчета на относительное движение точки.

---



---

<sup>1</sup> По имени французского ученого Гюстава Гаспара Кориолиса (G. Coriolis, 1792—1843 гг.).

И в сложном движении точки, и при переносном вращательном движении кориолисово ускорение равно нулю, если относительная скорость параллельна оси вращения. Так, корабль, плывущий по меридиану, имеет ускорение Кориолиса, если рассматривать его движение как составное из относительно движения корабля и переносного движения Земли. Это ускорение равно удвоенному произведению скорости корабля на угловую скорость Земли и на синус географической широты (рис. 90), и равняется нулю в то время, когда корабль пересекает экватор, и его относительная скорость параллельна вектору угловой скорости Земли.

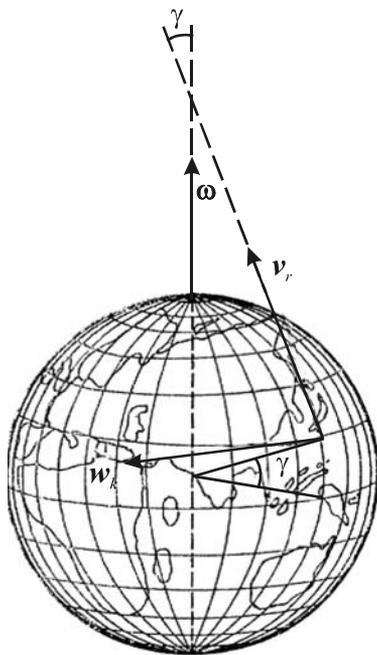


Рис. 90. К кориолисову ускорению

Поскольку кориолисова сила всегда перпендикулярна направлению движения тела, она не производит никакой работы. Иными словами, она лишь отклоняет направление движения частицы, но не изменяет величины ее скорости.



В прямолинейно движущейся НИСО сохраняется однородность пространства, а изотропность пространства не сохраняется, т. е. физически выделяется направление анизотропии пространства — направление вектора  $\mathbf{a}$ .

Во вращающейся НИСО пространство утрачивает и однородность, и изотропность. Неоднородность пространства во вращающейся системе отсче-

та проявляется в том, что на материальные тела, находящиеся во вращающейся системе отсчета, действует центробежная сила, величина которой зависит от величины радиус-вектора, т. е. от положения тела в пространстве.

Следовательно, точки пространства, находящиеся на разных расстояниях от оси вращения системы отсчета, неэквивалентны. Анизотропия пространства во вращающейся системе отсчета проявляется в зависимости от направления действия силы Кориолиса, т. е. от направления движения материального тела относительно вектора угловой скорости вращающейся неинерциальной системы.

Сила инерции Кориолиса проявляется в опыте с "**маятником Фуко**", придуманным французским ученым Жан-Бернаром Леоном Фуко́ (Jean Bernard Léon Foucault, 1819—1868 гг.) в 1850 г. — массивным шаром, подвешенным на достаточно длинной нити и совершающий малые колебания около положения равновесия. Поведение маятника Фуко объясняется неинерциальностью системы, связанной с Землей (рис. 90). Если бы система, связанная с Землей, была инерциальной, плоскость качаний маятника Фуко оставалась бы неизменной относительно Земли. На самом деле плоскость качаний маятника вследствие вращения Земли поворачивается, и проекция траектории маятника на поверхность Земли имеет вид розетки. Оригинальный 67-метровый маятник Фуко был подвешен к вершине купола парижского Пантеона. Копия маятника Фуко демонстрировалась в Исаакиевском соборе Ленинграда в 1931—1987 гг.

Среди десяти красивейших экспериментов за всю историю физики эксперимент с маятником Фуко занял десятое место<sup>1</sup>.

В 1857 г. российским естествоиспытателем Карлом Максимовичем (Карлом Эрнстом) Бэрм (1792—1876 гг.) был сформулирован **закон Бэра**:

Реки, текущие в направлении меридиана, в Северном полушарии подмывают правый берег, в Южном — левый. Объясняется влиянием суточного вращения Земли на движение частиц воды в реке.



Реки, текущие в Северном полушарии на юг (Днепр, Дон, Волга и др.), размывают свои западные берега. В результате, западный берег оказывается крутым, а восточный — пологим.

Следует отметить, что условия течения воды в реках очень сложны, поэтому факт преимущественного подмывания правого берега не следует целиком приписывать только действию силы Кориолиса.

<sup>1</sup> По результатам опроса американских физиков, проведенного сотрудником философского факультета Университета штата Нью-Йорк Робертом Кризом (Robert Crease) и историком Brookhaven National Laboratory Стони Брук (Stony Brook).

При движении тел вдоль экватора сила Кориолиса направлена вертикально по радиусу от центра Земли, если тело движется с запада на восток, и к центру Земли, если тело движется с востока на запад. При вертикальном движении тела в земном поле тяжести также действует сила Кориолиса, что учитывают при запуске ракет, снарядов и т. д.



При свободном падении тел на них действует кориолисова сила, обуславливающая отклонение к востоку от линии отвеса. Эта сила максимальна на экваторе и обращается в ноль на полюсах. Это отклонение, однако, очень незначительно. Так, отклонение при падении с высоты 100 м на широте  $60^\circ$  составляет всего около 1 см.

---

Для тел, движущихся вблизи земной поверхности, этот эффект, возникающий вследствие вращения Земли вокруг своей оси, сводится к тому, что вертикально падающие тела будут отклоняться к востоку, а тела, движущиеся вдоль земной поверхности, будут отклоняться в Северном полушарии вправо, а в Южном — влево от направления их движения.

☞ Летящий снаряд (ракета) также испытывает отклонения, обусловленные кориолисовыми силами инерции. При выстреле из орудия, направленного на север, снаряд будет отклоняться к востоку в Северном полушарии и к западу — в Южном. ☐

Большую роль сила Кориолиса играет в метеорологических явлениях. Например, пассаты — ветры, дующие от тропиков к экватору, — без вращения Земли должны были бы быть направлены в Северном полушарии точно с севера на юг (в Южном — с юга на север). В действительности же под влиянием кориолисовой силы они отклоняются к западу.

Рассмотрим область пониженного давления (**циклон**) на каком-то участке Земли. В результате перепада давления  $\frac{dp}{dr}$  молекулы воздуха устремляются в центр низкого давления. Из-за силы Кориолиса в Северном полушарии в циклоне возникает ветер против часовой стрелки, в Южном полушарии — по часовой стрелке.

**Антициклон** — область повышенного давления. В результате перепада давления молекулы воздуха устремляются от центра высокого давления. На них начинает действовать сила Кориолиса, направленная перпендикулярно радиусу. Вследствие наличия силы Кориолиса в Северном полушарии в области антициклона возникает ветер по часовой стрелке, в Южном полушарии — против часовой стрелки.

### Контрольные вопросы

- ? Когда возникает сила инерции Кориолиса? Напишите ее значение в векторной форме.
- ? Действует ли сила Кориолиса на экваторе?
- ? Покажите направление силы инерции Кориолиса, действующей на частицы воздуха в области циклона и антициклона в Северном и Южном полушариях.

## 7.7. Реактивное движение; движение тела с переменной массой. Формула Циолковского. Уравнение Мещерского

Применим *закон сохранения импульса* к горизонтальному выстрелу из пушки. При стрельбе возникает отдача — ядро движется вперед, а пушка откатывается назад. Пусть пушка и ядро — два взаимодействующих тела, составляющих *замкнутую систему*<sup>1</sup>. Скорость, которую приобретает пушка при отдаче, зависит от скорости ядра и соотношения масс пушки и ядра (рис. 91).

**Принцип реактивного движения** можно сформулировать так: если замкнутая система выбрасывает часть своей массы в каком-нибудь определенном направлении, то она приобретает импульс (количество движения) в противоположном направлении<sup>2</sup>.

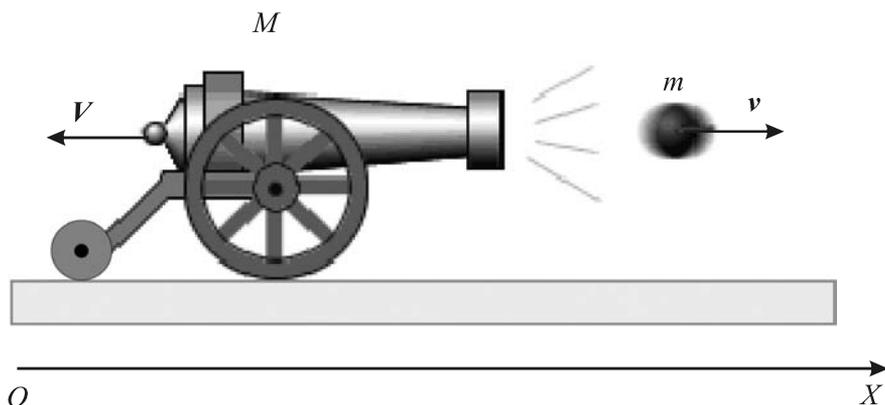


Рис. 91. Отдача при выстреле из пушки

<sup>1</sup> Реально на Земле такая система не будет замкнутой из-за наличия силы тяжести и силы реакции опоры. Но так как эти силы направлены перпендикулярно направлению стрельбы, а силами трения мы можем пренебречь, то такую систему можно считать горизонтально замкнутой.

<sup>2</sup> Открыт Ньютоном в 1686 г.

Принцип реактивного движения позволил создать **ракету**<sup>1</sup> — летательный аппарат, движущийся под действием **реактивной силы**, возникающей при отбросе массы сгорающего ракетного топлива (рабочего тела). Бывают неуправляемые и управляемые, изменяющие параметры траектории в полете; одно- и многоступенчатые (каждая ступень обеспечивает разгон ракеты на определенном участке, а затем отделяется) ракеты. Применяются в военном деле, космонавтике и др.

Движение тел может сопровождаться непрерывным изменением их массы. Например, масса движущейся капли может уменьшаться вследствие испарения или, наоборот, увеличиваться при конденсации паров на ее поверхности; масса ракеты при реактивном движении изменяется по мере сгорания топлива и т. д. Изменение массы тел приводит к некоторому усложнению формул, по которым рассчитывается их движение.

Выведем уравнение движения тел с уменьшающейся массой при некоторых упрощающих предположениях. Допустим, что в начальный момент времени тело с массой  $M_0$  покоилось относительно некоторой системы отсчета, связанной, например, с Землей. По истечении времени  $t$  масса тела сделалась равной  $M$ , а скорость —  $v$ . За каждый промежуток времени от тела отделяется масса  $dm$ , причем будем предполагать, что по окончании процесса отделения каждая из этих элементарных масс имеет одну и ту же конечную скорость  $u$ . Далее предположим, что на тело не действуют внешние силы, поэтому выбрасывание массы  $dm$  производится силами взаимодействия  $f_1$  и  $f_2$  между телом и его отделяющимися частями. Эти внутренние силы по третьему закону Ньютона равны по величине и противоположны по направлению. За время  $dt$  масса тела уменьшается на  $dM$ , а скорость — увеличивается на  $dv$ . Сила  $f_1$ , действующая на массу  $M - dM$ , изменяет ее импульс на величину, равную:

$$f_1 dt = (M - dM)(v + dv) - (M - dM)v \approx Mdv. \quad (210)$$

Сила, действующая на выбрасываемую массу  $dm$ , изменяет скорость ее движения от начального значения  $v$  до конечного  $u$ :

$$f_2 dt = (u - v)dm. \quad (211)$$

Так как  $f_1 = -f_2$ , а отделяющаяся масса  $dm$  равняется уменьшению массы тела, т. е.  $dm = -dM$ , то импульс, приобретаемый телом за время  $dt$ , будет равен:

$$Mdv = (u - v)dM. \quad (212)$$

<sup>1</sup> От нем. rakete.

Разность скоростей  $(\mathbf{u} - \mathbf{v}) = \mathbf{w}$  есть относительная скорость отделяющихся масс относительно самого тела (по абсолютной величине  $w = u + v$ ); для ракеты это есть средняя скорость выбрасываемых продуктов сгорания относительно корпуса ракеты. Так как  $\mathbf{w}$  направлена противоположно скорости  $d\mathbf{v}$ , то при замене векторного уравнения (212) скалярным, вместо  $(\mathbf{u} - \mathbf{v})$  следует написать  $-w$ :

$$d\mathbf{v} = -w \frac{dM}{M}. \quad (213)$$

Знак "минус" означает, что увеличение скорости тела (положительное  $dv$ ) сопровождается уменьшением массы тела (отрицательное  $dM$ ).

Если дополнительно предположить, что скорость  $w$  отделяющихся масс относительно самого тела сохраняется в процессе движения постоянной, то уравнение  $d\mathbf{v} = -w \frac{dM}{M}$  легко интегрируется, и в результате получается **формула Циолковского**:

$$v = w \ln \left( 1 + \frac{M_0 - M}{M} \right) = w \ln \left( 1 + \frac{M_T}{M_P} \right), \quad (214)$$

где  $M_T$  — начальная масса топлива;  $M_P$  — масса ракеты без топлива. Отношение

$\frac{M_T}{M_P}$  называют **числом Циолковского**. Полученная Циолковским

формула  $\frac{M_T}{M_P} = \exp \left( \frac{v}{w} \right) - 1$  позволяет рассчитывать запас топлива, необходимого для сообщения ракете скорости  $v$ .



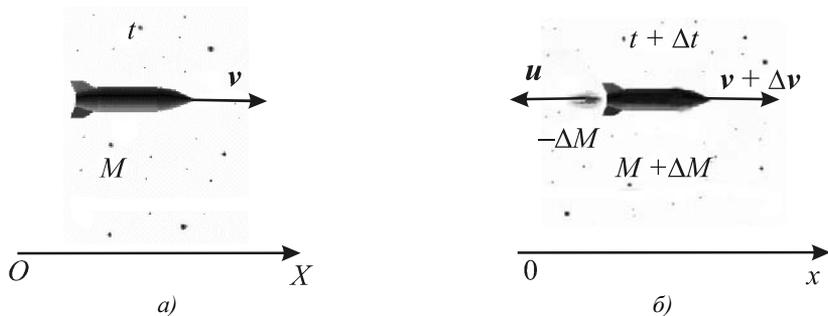

---

Приращение скорости ракеты за конечный промежуток времени определяется скоростью истечения газов из выходного сопла ракеты и отношением массы сожженного топлива к оставшейся массе ракеты (рис. 92).

---

Из формулы Циолковского следует, что конечная скорость ракеты может превышать относительную скорость истечения газов. Следовательно, ракета может быть разогнана до больших скоростей, необходимых для космических полетов. Но это может быть достигнуто только путем расхода значительной массы топлива, составляющей большую долю первоначальной массы ракеты. Например, для достижения *первой космической скорости*  $v = 7,9 \cdot 10^3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$

при  $u = 3 \cdot 10^3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  (типичные скорости истечения газов при сгорании топлива  $(2-4) \cdot 10^3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ) стартовая масса одноступенчатой ракеты должна примерно в 14 раз превышать конечную массу. Для достижения конечной скорости  $v = 4u$  отношение  $M_0/M$  должно быть равно 50.



**Рис. 92.** (а) — ракета, движущаяся в свободном пространстве (без гравитации) в момент времени  $t$ . Масса ракеты  $M$ , ее скорость  $v$ . (б) Ракета в момент времени  $t + \Delta t$ . Масса ракеты  $M + \Delta M$ , где  $\Delta M < 0$ , ее скорость  $v + \Delta v$ , масса выброшенных газов  $-\Delta M > 0$ , относительная скорость газов  $u$ , скорость газов в ИСО  $u + v$

**Сила тяги** — сила, приложенная к корпусу ракетного двигателя со стороны продуктов сгорания. Типичные единицы измерения силы тяги — килоньютон (кН, kN) ( $1 \text{ кН} = 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{-2}$ ) и килограмм-сила (кгс, кГ, kgf) ( $1 \text{ кгс} = 9,80665 \text{ Н}$ ).

Уравнение Циолковского является частным случаем основного векторного дифференциального уравнения движения тела переменной массы для случая присоединения и отделения частиц — **уравнения Мещерского**<sup>1</sup>:

$$M \frac{dv}{dt} = F + v_1 \frac{dM_1}{dt} + v_2 \frac{dM_2}{dt}, \quad (215)$$

где  $M$  — масса тела;  $v$  — его скорость;  $t$  — время;  $F$  — равнодействующая приложенных сил;  $v_1$  — относительная скорость отделяющихся частиц;  $v_2$  — относительная скорость присоединяющихся частиц;  $v_1 \frac{dM_1}{dt} \equiv \Phi_1$  — **реактивная сила (тяги)**;  $v_2 \frac{dM_2}{dt} \equiv \Phi_2$  — тормозящая сила, обусловленная присоединением частиц.

<sup>1</sup> Выведено российским ученым Иваном Всеволодовичем Мещерским (1859—1935 гг.) в 1904 г.



Реактивная сила пропорциональна скорости изменения массы движущегося тела, относительной скорости и направлена в сторону, противоположную вектору относительной скорости.

---

Твердотопливные ракетные двигатели — пороховые ракеты — появились в Китае в X в. Мысль о возможности применения реактивного движения для полетов была впервые высказана в 1881 г. российским народовольцем Николаем Ивановичем Кибальчицем (1853—1881 гг.) незадолго до казни в его "Проекте воздухоплавательного прибора". По его расчетам реактивная сила поднимала аппарат, удерживала его над землей. В качестве топлива предполагалось использовать особый медленно горящий прессованный порох, но предусматривалось и применение в будущем и других видов топлива, в том числе и жидкого. В 1903 г. К. Э. Циолковский в работе "Исследование мировых пространств реактивными приборами" впервые в мире выдвинул основные положения теории жидкостных ракетных двигателей и предложил основные элементы реактивного двигателя на жидком топливе.

**Ракетный двигатель** — реактивный двигатель, не использующий для работы окружающую среду (воздух, воду) (рис. 93). Применяют на ракетах (отсюда название), самолетах и др.

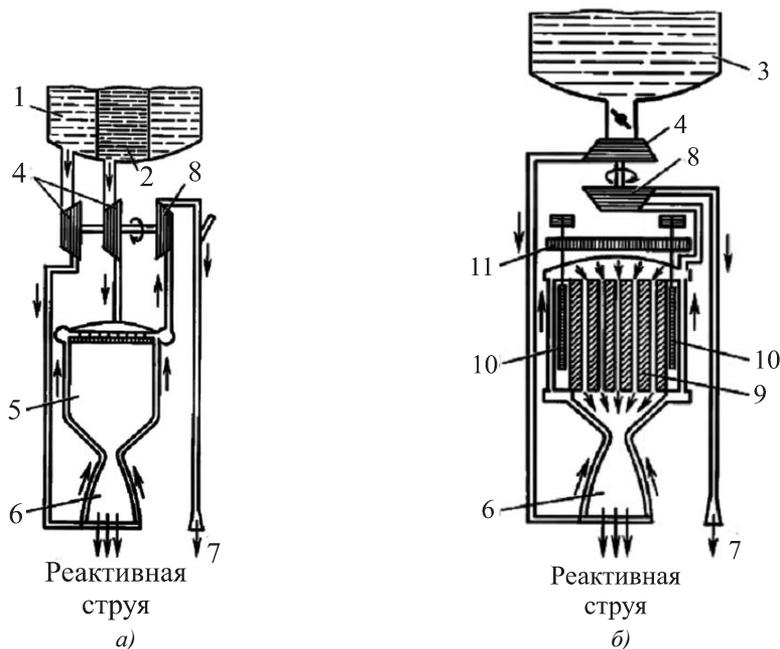
**Жидкостный ракетный двигатель (ЖРД)** — химический ракетный двигатель, работающий на жидком топливе, состоящем в основном из окислителя и горючего (рис. 94).

Первые реактивные двигатели в СССР были сконструированы Фридрихом Артуровичем Цандером (1887—1933 гг.). Первые советские жидкостные ракетные двигатели (ОРМ, ОРМ-1, ОРМ-2) были спроектированы советским конструктором Валентином Петровичем Глушко (1908—1989 гг.) и под его руководством созданы в 1930—1931 гг. В 1932 г. в крепостном Иоанновском равелине на территории Петропавловской крепости в Ленинграде была открыта Газодинамическая лаборатория — первая отечественная организация, разрабатывавшая ракетные двигатели. В 1941 г. был создан, а 15 мая 1942 г. испытан первый отечественный реактивный самолет с ЖРД БИ-1 (конструкторы Александр Яковлевич Березняк (1912—1974 гг.), Алексей Михайлович Исаев (1908—1971 гг.), Л. Душкин).

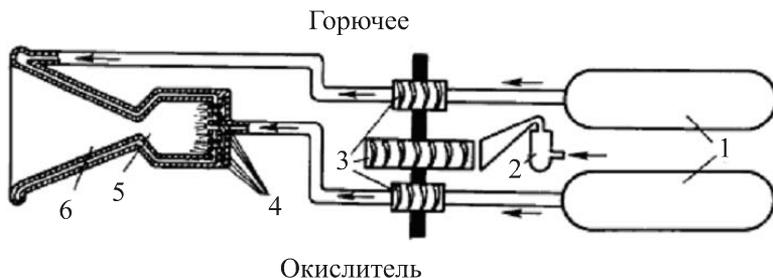
**Ракета-носитель** служит для достижения *первой* или *второй космической скорости* и вывода космического объекта на заданную орбиту.

Значительное снижение стартовой массы ракеты может быть достигнуто при использовании **многоступенчатых ракет** (рис. 95), когда ступени ракеты отделяются по мере выгорания топлива. Из процесса последующего разгона ракеты исключаются массы контейнеров, в которых находилось топливо,

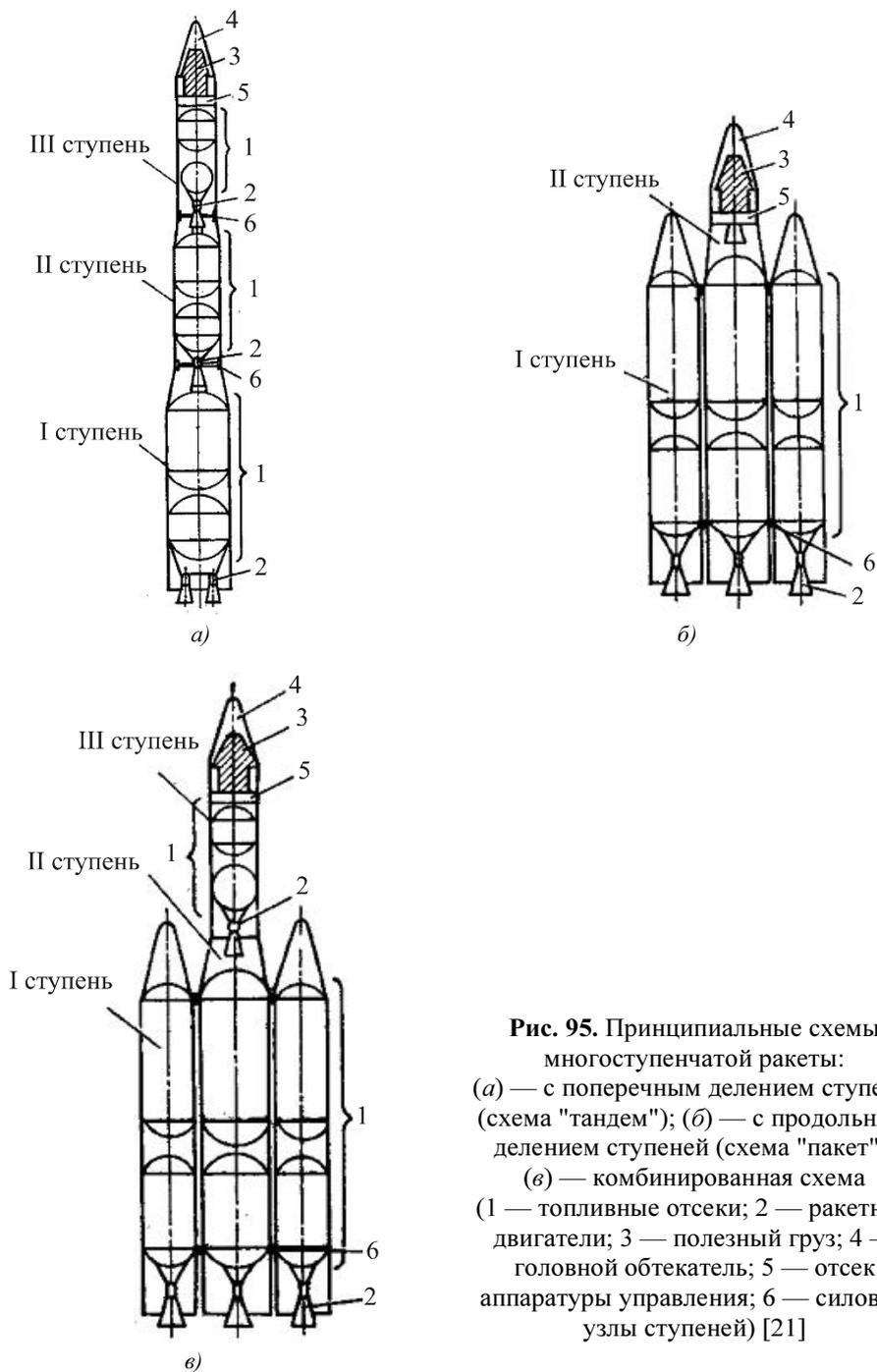
отработавшие двигатели, системы управления и т. д. Конструктивно многоступенчатая ракета может быть выполнена с поперечным делением ступеней: (схема "тандем" (рис. 95, а), с продольным делением (схема "пакет" (рис. 95, б) или представлять комбинацию этих двух схем (рис. 95, в)).



**Рис. 93.** Схемы ракетных двигателей: (а) — химического; (б) — ядерного; 1 — бак с жидким окислителем; 2 — бак с жидким горючим; 3 — бак с жидким водородом; 4 — насос; 5 — камера сгорания; 6 — сопло; 7 — выхлоп газов из турбины; 8 — турбина; 9 — тепловыделяющие элементы; 10 — стержни управления; 11 — защитный экран



**Рис. 94.** Схема жидкостного ракетного двигателя с турбонасосным агрегатом: 1 — баки; 2 — парогенератор; 3 — турбонасосный агрегат; 4 — форсунки; 5 — камера сгорания; 6 — сопло

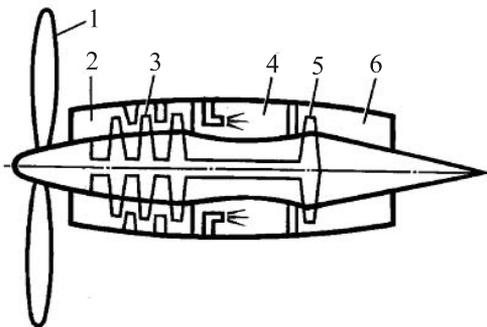


**Рис. 95.** Принципиальные схемы многоступенчатой ракеты:  
 (а) — с поперечным делением ступеней (схема "тандем"); (б) — с продольным делением ступеней (схема "пакет");  
 (в) — комбинированная схема (1 — топливные отсеки; 2 — ракетные двигатели; 3 — полезный груз; 4 — головной обтекатель; 5 — отсек аппаратуры управления; 6 — силовые узлы ступеней) [21]

Примером комбинированной схемы соединения ступеней служит ракета-носитель космического корабля "Восток", созданная в ЦКБ-1, возглавляемом С. П. Королевым. Ракета-носитель "Восток" представляет собой трехступенчатую ракету, состоящую из шести блоков: центрального, четырех боковых и блока третьей ступени. Первая и вторая ступени (соответственно боковые и центральные блоки) выполнены по схеме с продольным делением, третья ступень, устанавливаемая на центральном блоке, — по схеме с поперечным делением.

На составные ракеты также распространяется формула Циолковского — для отдельных ступеней ракеты характеристические скорости складываются.

**Турбовинтовой двигатель (ТВД)** — турбокомпрессорный двигатель, у которого тяга в основном создается воздушным винтом, приводимым во вращение газовой турбиной, и частично прямой реакцией потока газов, вытекающих из реактивного сопла (рис. 96).

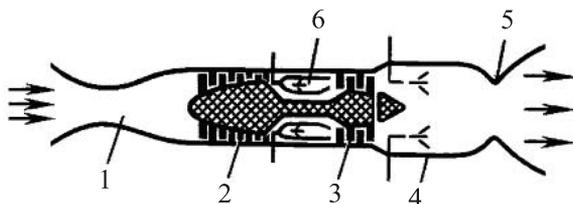


**Рис. 96.** Схема турбовинтового двигателя: 1 — воздушный винт; 2 — входное устройство; 3 — компрессор; 4 — камера сгорания; 5 — турбина; 6 — реактивное сопло

**Турбореактивный двигатель (ТРД)** — турбокомпрессорный двигатель, в котором тяга создается прямой реакцией потока сжатых газов, вытекающих из сопла (рис. 97). Первая схема турбореактивного двигателя была предложена русским инженером Н. Герасимовым в 1909 г.

**Турбореактивный двухконтурный двигатель (ТРДД)** — воздушно-реактивный двигатель, в котором поступающий в него воздух делится на 2 потока, проходящих через внутренний и внешний контуры. ТРДД экономичнее обычного турбореактивного на дозвуковых скоростях, менее шумный.

Первым пассажирским самолетом с турбореактивными двигателями стал английский ДН.106 Comet-1, впервые испытанный 27 июля 1949 г., а со 2 мая 1952 г. совершавший регулярные международные рейсы.



**Рис. 97.** Схема турбореактивного двигателя: 1 — входное устройство; 2 — компрессор; 3 — турбина; 4 — форсажная камера; 5 — сопло; 6 — камера сгорания

Первым отечественным реактивным пассажирским самолетом и одновременно первым в мире массовым реактивным пассажирским самолетом в регулярной эксплуатации стал Ту-104 конструкции Алексея Николаевича Туполева (1888—1972 гг.), совершивший первый полет 10 июля 1955 г.

### Контрольные вопросы

- ? Какое движение называют реактивным?
- ? Верно ли утверждение: "для осуществления реактивного движения не требуется взаимодействия с окружающей средой"?
- ? На каком законе основано реактивное движение?
- ? Запишите закон сохранения импульса для реактивного движения.
- ? От чего зависит скорость ракеты?

## ГЛАВА 8

# Работа. Мощность. Энергия. Закон сохранения и превращения энергии

### 8.1. Работа силы

Энергетические характеристики движения вводятся на основе понятия механической работы или работы силы.

Пусть сила  $F$ , действующая на прямолинейно перемещающуюся точку  $M$ , — постоянная и составляет постоянный угол  $\alpha$  с перемещением  $S$  точки  $M$  (рис. 98).

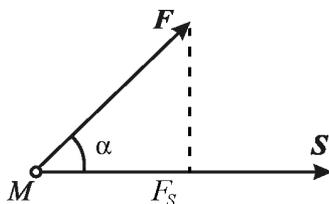


Рис. 98. К работе силы

За бесконечно малый промежуток времени  $dt$  материальная точка пройдет элементарный путь по траектории и переместится в пространстве на некоторую величину. На этом участке на точку может действовать сила  $F$ , направленная под углом  $\alpha$  к перемещению.

**Работа силы** — мера действия силы  $F$ , зависящая от ее модуля и направления, и от перемещения  $S$  точки приложения силы, равная проекции силы на направление перемещения точки ее приложения, умноженной на величину этого перемещения (рис. 99):  $A = FS = (F \cos \alpha)S = F_S S$ .

**Элементарная работа**  $dA$  силы  $F$  на бесконечно малом перемещении  $dS$  — скалярное произведение вектора силы на вектор перемещения:

$$dA = FdS = F \cos \alpha \cdot dS = F_S dS. \quad (216)$$

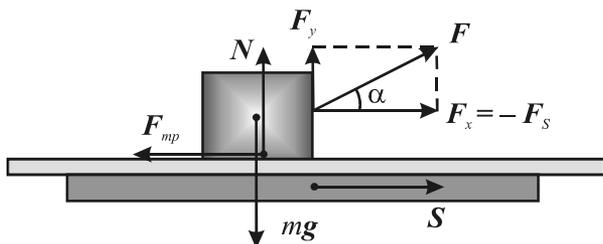


Рис. 99. Работа силы  $F$  :  $A = FS = (F \cos \alpha)S = F_S S$

В декартовых координатах:

$$dA = F_x dx + F_y dy + F_z dz, \quad (217)$$

где  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  — проекции силы на координатные оси;  $x$ ,  $y$ ,  $z$  — координаты точки ее приложения.

Работа является *скалярной величиной*. Она может быть как положительной ( $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ ), так и отрицательной ( $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ ). Из определения работы следует, что сила, направленная перпендикулярно пути ( $\alpha = 90^\circ, 270^\circ$ ), не производит работы. В частности, при равномерном движении материальной точки по окружности работа сил равна нулю.

В системе СИ единица работы — **джоуль**<sup>1</sup> (Дж, J):  $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

В системе СГС — **эрг** (erg) (1 эрг равен работе, совершаемой силой в 1 дин на пути в 1 см).  $1 \text{ Дж} = 10^5 \text{ дин} \cdot 10^2 \text{ см} = 10^7 \text{ эрг}$ .

В системе МКГСС — килограмм-сила на метр (1 кгс·м равен работе, совершаемой силой в 1 кгс на пути в 1 м).  $1 \text{ кгс} \cdot \text{м} = 9,80655 \text{ Н} \cdot \text{м} = 9,80655 \text{ Дж}$ . Единицу кгс·м иногда неправильно называют "килограммометром".

Если проекция  $F_S$  силы  $F$  на направление перемещения  $S$  не остается постоянной, работу следует вычислять для малых перемещений  $\Delta S_i$  и суммировать результаты:

$$A = \sum_i \Delta A_i = \sum_i F_{S_i} \Delta S_i. \quad (218)$$

Эта сумма в пределе ( $\Delta S_i \rightarrow 0$ ) переходит в интеграл:  $A = \int_S F_S dS$ .

<sup>1</sup> Названа в честь английского физика Джеймса Прескотта Джоуля (James Prescott Joule, 1818—1989 гг.).

Графически работа определяется по площади криволинейной фигуры под графиком  $F_S(x)$  (рис. 100).

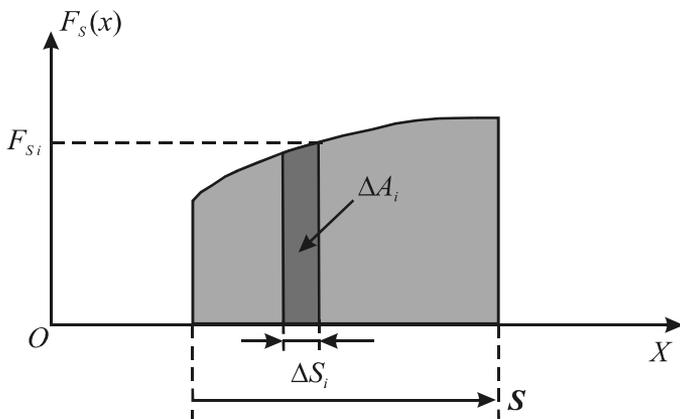


Рис. 100. Графическое определение работы.  $\Delta A_i = F_{Si} \Delta S_i$

Если к телу приложено несколько сил, то общая работа всех сил равна работе равнодействующей приложенных сил (рис. 101).

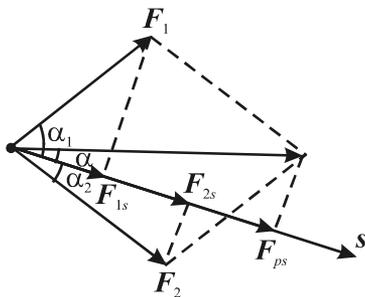


Рис. 101. Работа равнодействующей силы

$$F_p = F_1 + F_2, \quad A = F_1 \cos \alpha_1 S + F_2 \cos \alpha_2 S = F_{1s} S + F_{2s} S = F_{ps} S = F_p S \cos \alpha$$

Примером силы, модуль которой зависит от координаты, может служить упругая сила пружины, подчиняющаяся закону Гука (см. разд. 6.3). Для того чтобы растянуть пружину, к ней нужно приложить внешнюю силу, модуль которой пропорционален удлинению пружины.

### Контрольные вопросы

? Что называют механической работой? Какая формула выражает смысл этого понятия?

- ? В каких случаях о силе можно сказать, что она совершает работу?
- ? В каком случае сила совершает положительную работу и в каком — отрицательную?
- ? Чему равна работа силы, если эта сила направлена под острым и тупым углом к перемещению тела?
- ? При каком условии сила, приложенная к движущемуся телу, не совершает работу?
- ? Какова единица работы в системе СИ? Сформулируйте определение этой единицы.
- ? Автомобиль движется по ровной дороге. Совершает ли работу действующая на автомобиль сила тяжести?

## 8.2. Мощность

**Мощность** — физическая величина, равная *работе*, совершаемой силой в единицу времени. Если работа производится равномерно, то:

$$N = \frac{A}{t}, \quad (219)$$

где  $A$  — работа, совершенная силой за время  $t$ .

Если мощность переменна, то вводятся понятия средней и мгновенной мощности. **Средней мощностью**  $N_{cp}$  за время  $\Delta t$  называют отношение:

$$N_{cp} = \frac{\Delta A}{\Delta t} \quad N_{cp} = \frac{\Delta A}{\Delta t}, \quad (220)$$

где  $\Delta A$  — работа, совершенная силой за время  $\Delta t$ .

В пределе при  $\Delta t$ , стремящемся к нулю, средняя мощность переходит в **мгновенную**:

$$N = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta A}{\Delta t} = \frac{dA}{dt}, \quad (221)$$

где  $dA$  — элементарная работа, производимая силой за элементарный промежуток времени  $dt$ .

**Мгновенная мощность** равняется произведению *мгновенной скорости* на проекцию силы в направлении перемещения:

$$N = \frac{dA}{dt} = \frac{F_S dS}{dt} = F_S v = vF \cos \alpha = \mathbf{v} \mathbf{F}.$$

Единица мощности в системе СИ — **1 ватт**<sup>1</sup> (Вт, W):  $1 \text{ Вт} = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ .

<sup>1</sup> Названа в честь Джеймса Уатта.

Еще в XVIII в. единицу мощности "лошадиная сила" ввел в обиход шотландский изобретатель и механик Джеймс Уатт (James Watt, 1736—1819 гг.) с целью выяснить для финансовых расчетов с не всегда технически грамотными заказчиками, сколько дорогостоящих лошадей высвободит его паровая машина при трудоемкой откачке воды из каменноугольной шахты. Позднее оказалось, что "лошадиная сила" примерно вдвое больше мощности средней лошади, но единица применяется до сих пор.

**Лошадиная сила** (л. с., hp): 1 л. с. = 745,7 Вт = 75 килограмм-сила-метр в секунду.

В качестве единиц *работы* часто используются единицы, производные от единиц мощности, — **киловатт-час** (кВт·ч, kWh) и его производные: 1 кВт·ч = 10 003 600 Вт·с =  $3,6 \cdot 10^6$  Дж.

### Контрольные вопросы

- ? Что называют мощностью? Какая формула выражает смысл этого понятия?
- ? К числу каких величин, скалярных или векторных, относится мощность?
- ? Какова единица мощности в системе СИ? Сформулируйте определение этой единицы измерения.
- ? Что такое лошадиная сила и каково ее соотношение с ваттом?

## 8.3. Энергия

Если тело способно совершить *работу*, то оно обладает энергией.

Термин "энергия" (вместо широко использовавшегося раньше термина "движущая сила") был введен в научный обиход в 1852 г. английским физиком Уильямом Джоном Макуорном Ранкином (W. Rankine, 1820—1872 гг.).

**Энергия** — общая количественная мера движения и взаимодействия всех видов материи.

Энергия не возникает из ничего и не исчезает, она может только переходить из одной формы в другую. Понятие энергии связывает воедино все явления природы.

---

<sup>1</sup> Слово "энергия" встречается еще в трудах Аристотеля (т. е. в III в. до н. э.), происходит от греческого "эргос" — работа и приставки "эн", означающей принадлежность корневого слова к чему-то объемному.

В соответствии с различными формами движения материи рассматривают разные виды энергии: механическую, внутреннюю, электромагнитную, химическую, ядерную и пр.

Энергия измеряется в тех же единицах, что и *работа*: в системе СГС — в эргах (Э), в СИ — в джоулях (Дж) (табл. 20). В атомной и ядерной физике, в физике элементарных частиц обычно применяется внесистемная единица — **электронвольт** (эВ, eV):  $1 \text{ эВ} \approx 1,60219 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 1,60219 \cdot 10^{-12} \text{ эрг}$ .

**Таблица 20.** Примеры значений энергии [1]

Пример	Энергия, Дж
Распад ядра урана	$1 \cdot 10^{-11}$
Взмах крыла комара	$1 \cdot 10^{-7}$
Удар пирушкой машинки	$1 \cdot 10^{-1}$
Лампа в 75 Вт в течение 1 мин	$4,5 \cdot 10^2$
Тяжелая работа за день	$1 \cdot 10^7$
Старт космического корабля	$9 \cdot 10^{11}$
Первая атомная бомба	$1 \cdot 10^{14}$
Ураган	$1 \cdot 10^{15}$
Эстонская ГРЭС за год	$5 \cdot 10^{16}$
100-мегатонная водородная бомба	$1 \cdot 10^{18}$
Сильное землетрясение	$6 \cdot 10^{18}$
Энергия, которую Земля получает от Солнца за год	$1 \cdot 10^{25}$
Энергия, выделяющаяся при вспышке сверхновой звезды	$1 \cdot 10^{42}$

### Контрольные вопросы

- ❓ Что называют энергией?
- ❓ Какова единица измерения энергии в системе СИ? Сформулируйте определение этой единицы.

## 8.4. Кинетическая и потенциальная энергии

Пусть движение прямолинейно и действующая на тело сила  $F$  постоянна и целиком идет на сообщение ему ускорения. В этом случае движение будет равноускоренным:

$$a = \frac{v - v_0}{t}, \quad (222)$$

на пути, равном:

$$l = v_0 t + \frac{at^2}{2} = \frac{v_0 + v}{2} t, \quad (223)$$

т. е. работа силы равняется:

$$A = Fl = mal = m \frac{v - v_0}{t} \frac{v_0 + v}{2} t = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}. \quad (224)$$

К такому же заключению можно прийти и в случае криволинейного движения и действия на тело переменной силы. По *второму закону Ньютона*

$F = ma$  при  $a = a_n + a_\tau$ ,  $a_\tau = \frac{dv}{dt}$ , и при  $m = \text{const}$ :

$$dA = m \frac{dv}{dt} dl = m \frac{dl}{dt} dv = mv dv = md \left( \frac{v^2}{2} \right) = d \left( \frac{mv^2}{2} \right), \quad (225)$$

$$A = \int_{v_0}^v mv dv = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}. \quad (226)$$

Величину, которая определяется только состоянием тела, называют **функцией состояния**. В формулах (224) и (226) функцией состояния является величина  $\frac{mv^2}{2}$ , которую называют кинетической энергией.

**Кинетическая энергия** материальной точки:

$$E_K = \frac{mv^2}{2}, \quad (227)$$

где  $m$  — масса, а  $v$  — скорость материальной точки.

Кинетическая энергия механической системы — энергия механической системы, зависящая от скоростей составляющих ее материальных точек. Кинетическая энергия механической системы равняется арифметической сумме кинетических энергий всех ее точек.

Кинетическая энергия твердого тела, движущегося поступательно, вычисляется так же, как кинетическая энергия точки, имеющей массу, равную массе всего тела.

Единицы измерения кинетической энергии те же, что и единицы измерения *работы*, хотя это различные физические величины (см. разд. 8.1).

Работа силы на некотором пути численно равняется разности кинетических энергий материальной точки в конечном и начальном ее положениях:

$$A = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2} = E_K - E_{K0}. \quad (228)$$

Это утверждение называют **теоремой о кинетической энергии**. Теорема о кинетической энергии справедлива и в общем случае, когда тело движется под действием изменяющейся силы, направление которой не совпадает с направлением перемещения.

Работа, совершенная внешними силами, действующими на тело (материальную точку), затрачивается на изменение его кинетической энергии. Если работа положительна, то кинетическая энергия тела возрастает. Если работа отрицательна (действие сил направлено против движения и тормозит его), то кинетическая энергия тела убывает.

Запасенная кинетическая энергия может быть использована для совершения работы над другим телом.

Кинетическая энергия материальной точки (тела) зависит только от ее массы и величины скорости. Кинетическая энергия не зависит от положения материальной точки в пространстве и от траектории.

**Потенциальная энергия** — часть общей энергии механической системы, находящейся в некотором силовом поле, зависящая от расположения точек (частиц) системы в этом поле.

Понятие потенциальной энергии имеет смысл только для систем, находящихся в силовом поле, в котором работа действующих на систему сил зависит лишь от начального и конечного положений системы и не зависит от *закона движения* точек системы, от вида их *траекторий*. Потенциальная энергия и определяет данное потенциальное силовое поле. Значение силы в любой точке поля равняется градиенту потенциальной энергии, взятому со знаком "минус".

Численно потенциальная энергия системы в данном положении равняется *работе*, которую произведут действующие на систему силы поля при перемещении системы из этого положения в положение, в котором потенциальная энергия условно принята равной нулю.

Работа, совершаемая силами, действующими на систему при ее перемещении, равна убыли ее потенциальной энергии:  $A_{12} = E_{П1} - E_{П2}$ .

Если работа сил положительна, то потенциальная энергия уменьшается. Если же работа сил отрицательна, то потенциальная энергия возрастает.

Если тело перемещается вблизи поверхности Земли, то на него действует постоянная по величине и направлению сила тяжести  $F = mg$ . Работа этой силы зависит только от вертикального перемещения тела. На любом участке пути работу силы тяжести можно записать через проекцию вектора перемещения  $\Delta S$  на ось  $OY$ , направленную вертикально вверх

$$\Delta A = F_T \Delta S \cos \alpha = -mg \Delta S_y, \quad (229)$$

где  $F_T = F_{Ty} = -mg$  — проекция силы тяжести,  $\Delta S_y$  — проекция вектора перемещения (рис. 102).

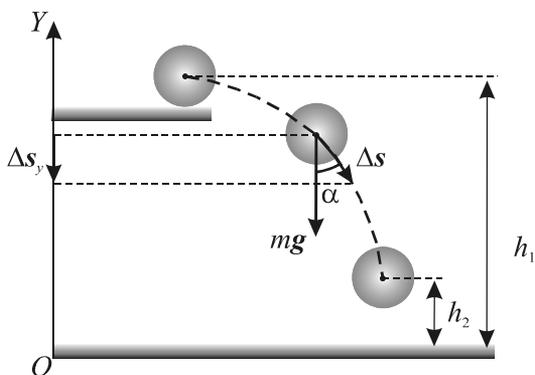


Рис. 102. Работа силы тяжести

При подъеме тела вверх сила тяжести совершает отрицательную работу, т. к.  $\Delta S_y > 0$ . Если тело переместилось из точки, расположенной на высоте  $h_1$ , в точку, расположенную на высоте  $h_2$  от начала координатной оси  $OY$ , то сила тяжести совершила работу:

$$A = -mg(h_2 - h_1) = -(mgh_2 - mgh_1). \quad (230)$$

Таким образом, в частном случае гравитационного поля Земли:

$$E_{П} = mgh, \quad (231)$$

где  $m$  — масса;  $g$  — ускорение свободного падения;  $h$  — высота.

Можно показать, что работа, идущая на преодоление силы тяжести, не зависит от пути, а зависит только от того, на какую высоту поднимается тело. Вся работа по перемещению тела по произвольному пути на высоту  $H$  :

$$A = - \int_0^H mg dh = -mg \int_0^H dh = -mgH = E_{\Pi 0} - E_{\Pi} . \quad (232)$$



В любом случае при подъеме тела на высоту  $H$  по произвольному пути приобретенная потенциальная энергия под действием силы тяжести равняется  $mgH$  .

Если рассматривать движение тел в поле тяготения Земли на значительных расстояниях от нее, то при определении потенциальной энергии необходимо принимать во внимание зависимость силы тяготения от расстояния до центра Земли (см. разд. 4.3). Для сил всемирного тяготения потенциальную энергию тел удобно отсчитывать от бесконечно удаленной точки, т. е. полагать потенциальную энергию тела в бесконечно удаленной точке равной нулю. Потенциальная энергия тела массой  $m$  на расстоянии  $r$  от центра Земли равняется:

$$E_{\Pi} = G \frac{Mm}{r} , \quad (233)$$

где  $M$  — масса Земли;  $G$  — гравитационная постоянная.

Можно ввести понятие о **центробежной энергии**  $E_{цб}$  как о потенциальной энергии частицы в поле центробежных сил:

$$-\frac{dE_{цб}}{dR} = m\omega^2 R \Rightarrow \quad (234)$$

$$\Rightarrow E_{цб} = -\frac{m\omega^2 R^2}{2} + \text{const} , \quad (235)$$

где  $\omega$  — угловая скорость;  $R$  — радиус вращения.

Произвольную константу логично выбрать равной нулю, т. е. отсчитывать потенциальную энергию от значения на оси вращения ( $R = 0$ ), где центробежная сила инерции равна нулю.

**Полная энергия** материальной точки — сумма кинетической и потенциальной энергий.

**Контрольные вопросы**

- ? Какие формы энергии Вы знаете?
- ? Выведите формулу для подсчета работы, совершаемой при изменении скорости тела.
- ? Что такое кинетическая энергия? Какая формула выражает смысл этого понятия? Скалярная это величина или векторная?
- ? В каких единицах измеряется кинетическая энергия в системе СИ?
- ? Какую энергию называют потенциальной?
- ? Какая формула выражает смысл потенциальной энергии тела, находящегося на некоторой высоте над Землей?
- ? Чему равна работа силы тяжести по замкнутой траектории?
- ? Что такое полная механическая энергия?

## 8.5. Консервативные силы

Если частица в каждой точке пространства подвержена воздействию сил или полей, то считают, что частица находится **в поле сил**.

Поле называют **центральной**, если поле таково, что направление силы, действующей на частицу в любой точке пространства, проходит через неподвижный центр, а величина силы зависит только от расстояния до этого центра ( $F = F(r)$ ).

Поле называют **однородным**, если во всех точках поля силы, действующие на частицу, одинаковы по величине и направлению ( $F = \text{const}$ ).

Поле, остающееся постоянным во времени, называют **стационарным**. Поле, изменяющееся со временем, называют **нестационарным**.

Для стационарного поля работа, совершаемая над частицей силами поля, в частном случае зависит лишь от начального и конечного положений частицы и не зависит от пути, по которому двигалась частица (228). Силы, обладающие таким свойством, называют **консервативными**.

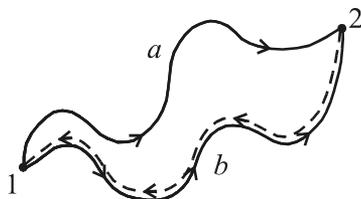
Работа консервативных сил на любом замкнутом пути равна нулю (рис. 103).

Примеры консервативных сил:

- *сила тяжести* (см. разд. 5.2);
- *упругие силы* (см. разд. 6.1).

Свойством консервативности обладают наряду с силой тяжести и силой упругости некоторые другие виды сил, например, сила электростатического

взаимодействия между заряженными телами (см. том "Электричество" данного курса).



**Рис. 103.** Работа консервативной силы  $A_{1a2} = A_{1b2}$ .

Работа на замкнутой траектории  $A = A_{1a2} + A_{2b1} = A_{1a2} - A_{1b2} = 0$

Все силы, не являющиеся консервативными, называют **неконсервативными силами**. К ним, в частности, относятся **диссипативные силы**, например *сила трения*, возникающая при скольжении какого-либо тела по поверхности другого.

Сила трения не обладает свойством консервативности. Работа силы трения зависит от пройденного пути. Понятие потенциальной энергии для силы трения вводить нельзя.

## 8.6. Энергия сжатой или растянутой пружины

Сжатая или растянутая пружина может сообщить телу скорость, следовательно, сжатая (или растянутая) пружина также обладает *энергией*, аналогичной рассмотренной ранее *потенциальной энергии* (см. разд. 8.4).

Поскольку при разжимании пружины сила ее упругости изменяется, то для вычисления совершенной пружиной работы на пути  $x$  следует взять среднее значение силы упругости  $\langle F_{\text{упр}} \rangle$ :

$$A = \langle F_{\text{упр}} \rangle x. \quad (236)$$

Сила упругости изменяется по *закону Гука* (148). Поскольку  $x$  изменяется от максимального значения до нуля, то сила упругости также будет изменяться от некоторого максимального значения до нуля. Ввиду прямо пропорциональной зависимости силы упругости от  $x$  среднее значение модуля силы упругости равно:

$$\langle F_{\text{упр}} \rangle = \frac{F + 0}{2}, \quad \langle F_{\text{упр}} \rangle = \frac{kx}{2}. \quad (237)$$

Работа, совершаемая силой упругости, а следовательно, и потенциальная энергия сжатой пружины, равны по модулю:

$$|A| = \frac{kx^2}{2} = |E_{II}|. \quad (238)$$



Потенциальной энергией обладают тела, взаимодействующие посредством сил тяготения и/или сил упругости.

Полная механическая энергия замкнутой системы тел, взаимодействующих силами тяготения или силами упругости, остается постоянной.

## 8.7. Закон сохранения и превращения энергии

Тело вещей до тех пор нерушимо, пока не столкнется  
С силой, которая их сочетание способна разрушить.  
Так что, мы видим, отнюдь не в ничто превращаются вещи,  
Но разлагаются все на тела основные обратно...  
Словом, не гибнет ничто, как будто совсем погибая,  
Так как природа всегда возрождает одно из другого.

Лукреций<sup>1</sup>

Ломоносов, повторив опыт Бойля с прокаливанием металла в закрытой колбе, высказал мысль о том, что вес металла увеличивается за счет соединения с воздухом (в 1775 г. французский химик Антуан Лоран Лавуазье (Antoine-Laurent Lavoisier, 1743—1794 гг.) уточнил, что металл соединяется с кислородом). В результате закон сохранения энергии был впервые сформулирован Ломоносовым, который еще в 1748 г. писал: "...так, ежели где убудет несколько материи, то умножится в другом месте... Сей всеобщий естественный закон простирается и в самые правила движения, ибо тело, движущее своею силою другое, столько же оныя у себя теряет, сколько сообщает другому, которое от него движение получает...". Однако это скорее догадка гениального ума, чем строгое доказательство закона. Попробуем вывести частный случай закона сохранения энергии — закон сохранения механической энергии.

Вспомним, что положительная работа, совершаемая силой, равняется увеличению кинетической энергии тела. С другой стороны, работа выполняется за

<sup>1</sup> Тит Лукреций Кар (Titus Lucretius Carus) — римский поэт и философ I в. до н. э.

счет убыли потенциальной энергии. Поэтому для замкнутой системы можно написать равенство:

$$-dE_{\Pi} = d\left(\frac{mv^2}{2}\right) \Rightarrow \quad (239)$$

$$\Rightarrow d\left(E_{\Pi} + \frac{mv^2}{2}\right) = 0 \Rightarrow \quad (240)$$

$$\Rightarrow E = E_{\Pi} + \frac{mv^2}{2} = \text{const.} \quad (241)$$




---

Полная механическая энергия замкнутой системы тел, в которой действуют лишь консервативные силы, остается постоянной.

---

При движении тела в поле силы тяжести происходит непрерывное превращение его кинетической энергии в потенциальную и обратно в эквивалентных количествах, так что полная энергия тела в замкнутой системе остается неизменной:

$$mgh + \frac{mv^2}{2} = \text{const.} \quad (242)$$




---

В изолированной (замкнутой) системе механическая энергия может переходить из одной формы в другую, но ее количество остается постоянным.

---

Теперь мы можем сформулировать **закон сохранения энергии в механике**: полная механическая энергия *изолированной* системы материальных точек, равная сумме кинетических энергий точек и потенциальной энергии их взаимодействия, есть величина постоянная.

Итак, при любых физических взаимодействиях энергия замкнутой системы не возникает и не исчезает. Она лишь превращается из одной формы в другую. Этот экспериментально установленный факт подтверждает более общий и фундаментальный закон природы — **закон сохранения и превращения энергии**.

Это строгий закон природы. В соответствии с этим законом невозможно существование **вечного двигателя (перпéтуум мóбиле<sup>1</sup>)**. С 1775 г. Парижская

---

<sup>1</sup> Лат. *perpetuum mobile* — вечно движущийся.

Академия наук отказалась рассматривать проекты вечного двигателя. Тем не менее, известно немало число проектов "вечного двигателя". В некоторых из них ошибки очевидны, в других эти ошибки замаскированы сложной конструкцией прибора. Бесплодные попытки создания "вечного двигателя" продолжаются и в наше время.

Закон сохранения энергии в механических процессах является следствием законов Ньютона. Закон сохранения механической энергии выполняется только тогда, когда тела в замкнутой системе взаимодействуют между собой посредством консервативных сил, т. е. сил, для которых можно ввести понятие потенциальной энергии.

В реальных земных условиях практически всегда на движущиеся тела наряду с силами тяготения, силами упругости и другими консервативными силами действуют силы трения или силы сопротивления среды.

Если в незамкнутой системе, кроме консервативных, действуют также неконсервативные (**сторонние**) силы, например *силы трения*, то полная механическая энергия системы не сохраняется. Рассматривая неконсервативные силы как внешние, можно написать:

$$dE = d(E_K + E_{Пвз}) = dA_{неконсерв}. \quad (243)$$

Проинтегрировав это соотношение, получим:

$$E_2 - E_1 = A_{12неконсерв}. \quad (244)$$

Полная механическая энергия системы может изменяться при действии в системе неконсервативных сил, либо при взаимодействии с внешними силами.

**Консервативная система** — механическая система, при движении которой сумма ее кинетической и потенциальной энергии остается величиной постоянной, т. е. имеет место *закон сохранения механической энергии*:

$$E = E_K + E_{Пвз} + E_{Пвнешн} = \text{const}, \quad (245)$$

где  $E$  — полная механическая энергия системы;  $E_K$  — кинетическая энергия;  $E_{Пвз}$  — потенциальная энергия взаимодействия.

Пример консервативной системы — Солнечная система (см. разд. 4.2).

Консервативную систему не следует смешивать с *замкнутой системой*, для которой имеет место *закон сохранения импульса* (см. разд. 3.10), т. е. замкнутая система может не быть консервативной. Консервативная система может не быть замкнутой — например, колебания маятника в поле тяготения Земли (т. к. его движение происходит в потенциальном силовом поле, образованном телом, не входящим в консервативную систему (Землей)).

В классической физике законы сохранения массы (см. том "Молекулярная физика и термодинамика" данного курса) и энергии существовали как два независимых закона. В теории относительности (см. том "Элементы теории относительности" данного курса) они были слиты воедино.

### Контрольные вопросы

- ? Сформулируйте и запишите закон сохранения и превращения механической энергии.
- ? Дайте определение консервативной системы.

## 8.8. Центральные удар.

### Упругое и неупругое соударения двух тел

Закон сохранения механической энергии и закон сохранения импульса позволяют находить решения механических задач в тех случаях, когда неизвестны действующие силы. Примером такого рода задач является ударное взаимодействие тел.

**Удар (столкновение)** — кратковременное взаимодействие тел, в результате которого их скорости испытывают изменения. С ударным взаимодействием тел нередко приходится иметь дело в обыденной жизни, в технике и в физике (особенно в физике атома и элементарных частиц).

Во время столкновения тел между ними действуют кратковременные ударные силы, величина которых, как правило, неизвестна. Поэтому нельзя рассматривать ударное взаимодействие непосредственно с помощью *законов Ньютона*. Применение законов сохранения энергии и импульса во многих случаях позволяет исключить из рассмотрения сам процесс столкновения и получить связь между скоростями тел до и после столкновения, минуя все промежуточные значения этих величин.

**Центральным ударом** шаров называют соударение, при котором скорости шаров до и после удара направлены по линии, проходящей через их *центры масс* (рис. 104).

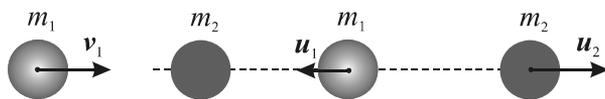


Рис. 104. Центральные удар шаров

Возможны два основных вида взаимодействия: упругое и неупругое. При **упругом ударе** тела отталкиваются. О **неупругом ударе** говорят в том случае, когда после взаимодействия тела объединились и стали двигаться как одно тело.

Пусть  $p = mv$  — импульс тела до взаимодействия, а  $p' = mu'$  — импульс тела после взаимодействия.

Рассмотрим центральный удар двух шаров. Шары движутся друг другу навстречу или движущийся позади шар догоняет передний шар. В обоих случаях, учитывая знаки скоростей, в некоторый момент времени произойдет центральный удар шаров.

Идеализированный случай **абсолютно упругого удара** — центральный удар, при котором не выделяется тепла, т. е. сохраняется вся механическая энергия системы.

В случае абсолютно упругого удара механическая энергия системы складывается только из кинетических энергий шаров, а потенциальная энергия при горизонтальном движении равна нулю (строго говоря, за исключением короткого момента соприкосновения шаров, когда они деформируются). При упругом центральном ударе двух тел одинаковой массы тела просто обменяются скоростями.

Для решения задачи о столкновении шаров достаточно применить закон сохранения импульса (см. разд. 3.10) и закон сохранения энергии (см. разд. 8.4).

Пусть даны скорости шаров до удара  $v_1$  и  $v_2$ , а также их массы  $m_1$  и  $m_2$ . Найдем скорости шаров после соударения  $u_1$  и  $u_2$ . Из закона сохранения импульса:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 u_1 + m_2 u_2, \quad (246)$$

то есть импульс системы после соударения равен импульсу системы до соударения. Из закона сохранения кинетической энергии:

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2}, \quad (247)$$

то есть кинетическая энергия системы после соударения равна кинетической энергии системы до соударения. Прделаем некоторые математические преобразования и решим систему уравнений:

$$m_1 (v_1^2 - u_1^2) = m_2 (u_2^2 - v_2^2), \quad (248)$$

$$m_1 (v_1 - u_1) = m_2 (u_2 - v_2) \Rightarrow \quad (249)$$

$$\Rightarrow v_1 + u_1 = u_2 + v_2 \Rightarrow \quad (250)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} u_1 = \frac{(m_1 - m_2)v_1 + 2m_2 v_2}{m_1 + m_2} \\ u_2 = \frac{(m_2 - m_1)v_2 + 2m_1 v_1}{m_1 + m_2} \end{cases}. \quad (251)$$

При соударении одинаковых шаров  $m_1 = m_2$ , поэтому  $u_1 = v_2$ ,  $u_2 = v_1$ .



При упругом центральном ударе двух тел одинаковой массы последние обмениваются скоростями.

Во многих случаях столкновения атомов, молекул и элементарных частиц подчиняются законам абсолютно упругого удара.

При ударе шара о массивную стену  $m_2 \gg m_1$ , поэтому  $u_1 \approx -v_1 + 2v_2$ ,

$$u_2 \approx v_2 + 2 \frac{m_1}{m_2} v_1 \approx v_2.$$



При ударе шара о более тяжелое тело скорость более тяжелого тела изменяется незначительно. В результате удара более тяжелому телу передается значительная часть импульса, но сравнительно небольшая часть энергии ударяющего шара.

Реальный случай — часть энергии перейдет в тепло, тело испытает *необратимую (пластическую) деформацию* (см. разд. 6.1).

**Абсолютно неупругим ударом** называют такое ударное взаимодействие, при котором тела соединяются друг с другом и движутся дальше как одно тело.

При абсолютно неупругом ударе механическая энергия не сохраняется. Она частично или полностью переходит во внутреннюю энергию тел (нагревание).

В этот момент суммарная кинетическая энергия обоих шаров уменьшится по сравнению с первоначальным ее значением до удара, т. к. часть ее перейдет в различные другие формы энергии.

К неупругому взаимодействию относятся и случаи, когда тело под действием внутренних причин распадается на две, три и более части. При неупругом взаимодействии двух тел возможны два случая ( $p_1$  и  $p_2$  — импульсы тел до соударения):

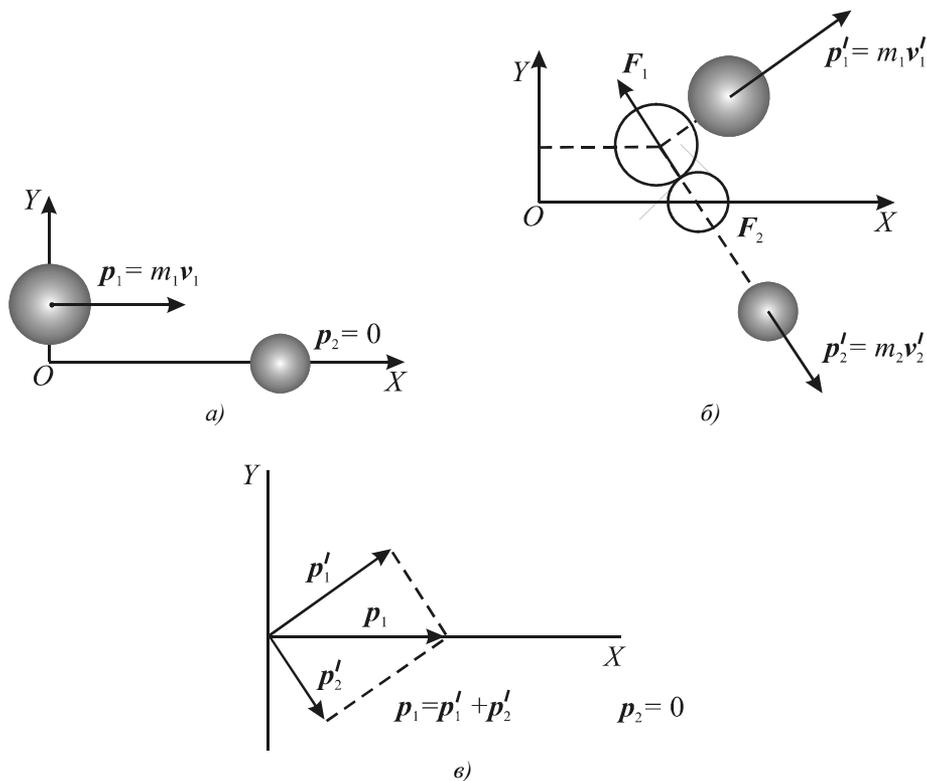
$$u_1 = u_2 = u, \quad p' = (m_1 + m_2)u, \quad p_1 + p_2 = p', \quad (252)$$

то есть тела объединяются,

$$v_1 = v_2 = v, \quad p = (m_1 + m_2)v, \quad p = p'_1 + p'_2, \quad (253)$$

то есть тела разделяются.

Поведение шаров разных масс при нецентральной ударе показано на рис. 105.



**Рис. 105.** Нецентральный соударение шаров разных масс.

(а) — импульсы до соударения,

(б) — импульсы после соударения, (в) — диаграмма импульсов

## 8.9. Деформации горных пород и закон сохранения и превращения энергии<sup>1</sup>

Что ограничивает высоту возвышенностей на поверхности Земли? Для простоты представим гору как некоторый блок из наиболее распространенного минерала — кварца, покоящийся на плоской поверхности того же материала. Можно предположить, что максимальная высота горы ограничена началом *пластической деформации* (см. разд. 6.1): при высоте, превышающей максимальную, гора становится неустойчивой, т. к. под ее тяжестью начинается пластическое течение материала основания.

<sup>1</sup> При изложении данной темы частично использованы материалы, любезно предоставленные А. Г. Редько.

Для большинства реальных случаев массивные горные породы, являются твердыми телами, изменение формы которых происходит по законам *теории упругой деформации* (см. разд. 6.1). В этом случае упругие свойства горных пород характеризуются *модулем Юнга  $E$* , *модулем сдвига  $G$* , *модулем объемной упругости  $K$*  и коэффициентом поперечных деформаций (*коэффициентом Пуассона*)  $\nu$ .

Модули упругости различных пород изменяются в пределах  $(1-3) \cdot 10^9 - (1-3) \cdot 10^{11}$  кгс·см<sup>-2</sup>. Наиболее низкие значения *модуля упругости* имеют пористые туфы, слабые глинистые сланцы, гнейсы. Наиболее высокие *модули упругости* у базальтов, диабазов, дунитов. С ростом плотности пород модули их упругости, как правило, возрастают. Модули упругости слоистых пород в направлении слоистости выше, чем перпендикулярно к слоистости.

Коэффициенты поперечных деформаций горных пород теоретически могут изменяться в пределах от 0 до 0,5. Для большинства пород они колеблются в интервале значений от 0,15 до 0,35. Минимальные значения  $\nu$  имеют некоторые биотитовые и известковые сланцы, опал, филлиты, гнейсы (0,01—0,08), максимальные — некоторые дуниты, амфиболиты (0,40—0,46).

Упругое деформирование представляет собой лишь частный случай поведения пород до некоторого значения напряжений, называемого *пределом упругости*. За пределом упругости происходит появление трещин в горном массиве или его пластическое деформирование с образованием необратимых остаточных деформаций. Для характеристики этого процесса применяют *модуль деформации*, представляющий собой отношение приращений напряжений к соответствующему приращению вызываемых ими деформаций.

Многие различные текстурные<sup>1</sup> особенности, наблюдаемые в континентальной коре, подтверждают, что один из важнейших типов механического поведения, проявившихся в горных породах, особенно в складчатых областях, — это вязкое течение в твердом состоянии [12].

Изучение течения горных пород позволило сделать вывод, что те или иные породы при определенных условиях ведут себя одновременно и как упругие, и как вязкие вещества; при других условиях какой-то один тип поведения может оказаться преобладающим вплоть до полного вытеснения всех других.

Таким образом, предположение о пластическом течении материала основания горы согласуется с имеющимися представлениями о деформируемости горных пород. Это предположение находится также в хорошем соответствии с

---

<sup>1</sup> **Текстура** — относительное расположение составных частей породы или соотношение отдельных участков, слагающих породу и характеризующих степень однородности ее сложения, или, иначе говоря, относительное расположение составных частей породы [7].

современными представлениями о строении Земли, в частности с представлением об изостазии [3].

**Изостазия<sup>1</sup> (изостатическое равновесие)** — равновесное состояние верхних горизонтов Земли (земной коры, литосферы), проявляющееся в том, что на определенной глубине (глубине компенсации 100—150 км) в недрах происходит выравнивание давления вышележащих горизонтов.

Явление изостазии состоит в том, что избыток или недостаток масс на поверхности Земли компенсируется обратным по знаку перераспределением масс в ее недрах. Механизм изостатической компенсации приводит к тому, что внешние оболочки Земли реагируют на приложенную к ним или снятую с них поверхностную нагрузку соответствующими вертикальными движениями и перераспределением масс в глубоких недрах.

Современные модели предполагают региональную изостатическую компенсацию, при которой литосфера реагирует на приложенную или снятую нагрузку изгибом, амплитуда и скорость которого зависят не только от величины нагрузки, но и от изгибной жесткости литосферы.

На рис. 106 показана схема региональной изостатической компенсации литосферы, к поверхности которой приложена нагрузка мощностью  $h$ , полушириной  $a$  и плотностью  $\rho_s$ . Изгиб литосферы пропорционален ее жесткости и, следовательно, абсолютно жесткая литосфера вообще не будет изгибаться под весом нагрузки.

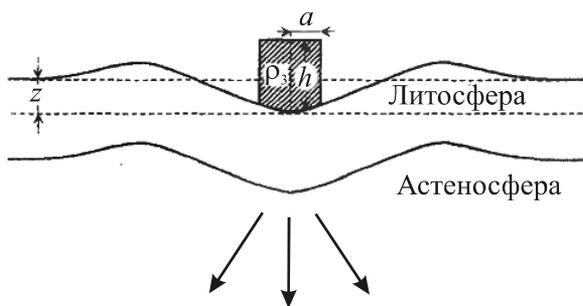


Рис. 106. Схема региональной изостатической компенсации

Как видно из рис. 106, упругий изгиб литосферы сопровождается оттоком от ее подошвы астеносферного материала, а также появлением характерных "вздутий" по периферии области приложения нагрузки. До тех пор, пока литосфера способна компенсировать приложенную к ней нагрузку своей упру-

<sup>1</sup> От греч. *stasis* — состояние.

гостью (жесткостью или прочностью на изгиб), она будет находиться на поверхности Земли, стремясь к состоянию региональной изостатической компенсации или находясь в нем. Если же величина нагрузки превысит прочность литосферы на изгиб, в ней образуются сквозные расколы, после чего отдельные блоки литосферы либо перейдут в состояние локальной изостатической компенсации (если их средняя плотность меньше плотности астеносферы), либо утонут в подстилающем субстрате.

Какое-то время после приложения и после снятия нагрузки литосфера будет не полностью изостатически скомпенсирована. В таких случаях говорят, что литосфера стремится к состоянию региональной изостатической компенсации.

По скорости восстановления изостазии (изостатического выравнивания) удастся определить такой важнейший для геодинамики параметр, как вязкость астеносферы. Природа сама ставит для этого эксперименты: нарушение изостазии может происходить за счет, например, образования или таяния ледников, эрозии горных сооружений, осадконакопления. Если скорость любого из перечисленных процессов или хотя бы время его проявления удастся установить в каком-то регионе достаточно точно, а литосфера этого региона не полностью изостатически скомпенсирована, то по скорости изостатического выравнивания определяется вязкость астеносферной части верхней мантии, в которой это выравнивание происходит.

Возвращаясь к предположению [63], что при высоте, превышающей максимальную, гора оказывается неустойчивой, т. к. под ее тяжестью начинается пластическое течение материала основания, мы видим, что такое течение в виде прогиба литосферы действительно может иметь место.

Пусть  $H$  — такая высота блока, при которой он начинает оседать. Ее можно приближенно считать максимально достижимой высотой горы. При высоте горы  $H$  выигрыш в энергии, связанный с понижением горы, равен энергии, которую необходимо затратить для осуществления пластической деформации ее основания. Количество деформируемого материала примерно совпадает с количеством материала, опускающегося вниз. Уменьшение высоты горы на величину  $\delta = H$  эквивалентно переносу слоя толщиной  $\delta$  с вершины горы на землю и смещению соответствующего объема материала путем пластического течения. Тогда приближенно можно полагать, что выигрыш в энергии силы тяжести при перемещении некоторого количества материала с высоты  $H$  на нулевую высоту должен совпадать с энергией пластической деформации такого же количества материала. Произведем расчет для отдельной молекулы. Пусть  $\varepsilon_p$  — энергия пластического течения, приходящаяся на одну молекулу. В таком случае:

$$AmgH = \varepsilon_p, \quad (254)$$

где  $A = 60$  — молекулярная масса  $\text{SiO}_2$ ;  $m$  — масса протона;  $g$  — ускорение свободного падения вблизи земной поверхности.

Оценим величину энергии  $\varepsilon_p$ . Пластическая деформация представляет собой изменение взаимного расположения молекул. При ее осуществлении размещение молекул может принимать вид, соответствующий скорее жидкой, чем твердой фазе. Такого же состояния можно достичь, расплавив материал и затем охладив полученную жидкость до исходной температуры. Если считать теплоемкости твердой и жидкой фаз одинаковыми, то энергия, необходимая для такого процесса, есть теплота плавления  $\varepsilon_M$  при температуре плавления. Для  $\text{SiO}_2$   $\varepsilon_M$  составляет 0,148 эВ на молекулу. Тогда, подставляя в соотношение (254)  $\varepsilon_p \approx 0,15$  эВ, получаем, что  $H \approx 14$  км. Этот результат весьма близок к фактическому значению (высота Джомолунгмы — 8848 м).

Мы получили оценку для  $\varepsilon_p$  из анализа конкуренции двух эффектов — земного притяжения и упругости формы материала. Энергию  $\varepsilon_p$ , характеризующую сопротивление материала пластической деформации, можно выразить в атомных единицах. Она составляет долю  $\xi\varepsilon_B$  от энергии связи  $\varepsilon_B = 6,5$  эВ (такая энергия требуется для отделения молекулы от твердого  $\text{SiO}_2$ ). Как и следовало ожидать, коэффициент  $\xi$  довольно мал ( $\xi = 0,023$ ). Энергия связи, в свою очередь, связана с энергией  $Ry$  ионизации атома водорода<sup>1</sup>:  $\varepsilon_B = \eta Ry$ , при этом  $\eta = 0,48$ . Итак, в терминах фундаментальных констант атомной физики для  $H$  получаем выражение:

$$H = \frac{\xi\eta Ry}{Amg}. \quad (255)$$

А что можно сказать о высоте гор на других планетах? Для ответа на этот вопрос необходимо выразить относящуюся к Земле величину  $g$  через гравитационную постоянную  $G$  (95):

$$g = G \frac{M}{R_3^2}, \quad (256)$$

где  $M$  и  $R_3$  — масса и радиус Земли соответственно. Поскольку

$$M = \frac{4\pi}{3} R_3^3 \rho_3, \quad (257)$$

<sup>1</sup>  $Ry$  — Ридберг — внесистемная единица энергии, равная 13,60 эВ, т. е. энергии связи электрона в атоме водорода в основном состоянии.

где  $\rho_3 = 5,5 \text{ г·см}^{-3}$  — средняя плотность Земли, имеем:

$$g = \frac{4\pi}{3} GR_3 \rho_3, \quad (258)$$

и с учетом выражения (255) получаем:

$$H = \frac{R_0^2}{R_3}, \quad (259)$$

$$R_0 = \frac{3}{4\pi} \frac{\xi \eta R_y}{AmG\rho_3}. \quad (260)$$

Если подставить сюда значения  $\xi$ ,  $\eta$  и  $\rho_3$ , соответствующие земным условиям, то окажется, что  $R_0$  равно 300 км. Из соотношения (260) следует, что максимальные высоты гор на поверхности различных планет обратно пропорциональны радиусам планет при условии примерной неизменности свойств их материалов (эти условия более или менее выполняются для Марса и Луны). Таким образом, горы и впадины на Марсе должны быть вдвое выше и вдвое глубже, чем на Земле, что и подтверждается наблюдениями (см. разд. 4.2). С другой стороны, неровности поверхности на Луне должны быть вшестеро больше по сравнению с Землей, однако на самом деле они гораздо меньше. Это связано с тем, что в отличие от Земли и Марса на Луне в течение длительного времени отсутствовала тектоническая деятельность, ее поверхность выравнивалась вследствие метеоритной эрозии и других факторов.

Согласно формуле (260), небесное тело радиуса  $R < R_0$  имеет на поверхности горы высотой порядка своего радиуса. Если такое тело после образования не подвергалось плавлению, то его форма может существенно отличаться от сферической; силы тяготения не в состоянии привести форму тела к сфере путем пластической деформации. Для планет с химическим составом, сходным с земным, критический радиус  $R_0$  составляет примерно 300 км. И действительно, все известные несферические небесные тела, например спутники Марса и некоторые спутники Сатурна, обладают размерами меньше  $R_0$ .

## ГЛАВА 9

# Основы механики твёрдого тела

### 9.1. Абсолютно твёрдое тело. Центр масс тела

При изучении законов движения тел в качестве модели мы использовали тело, размеры которого бесконечно малы по сравнению с областью, в которой тело перемещается, и для которого существенен только вопрос, где тело находится в данный момент времени, с какой скоростью и с каким ускорением движется. То есть фактически рассматривали либо *материальные точки*, либо тела, которые можно рассматривать как материальные точки.

Очевидно, что любой сложный объект, например тело произвольной формы, можно представить как объект, состоящий из большого числа материальных точек.

Если необходимо изучить движение такой группы тел, можно составить систему уравнений движения для всех материальных точек, образующих эту группу, введя совокупность координат, которые описывают относительные расположения всех точек в пространстве и местоположение этих точек по отношению к системе координат, выбранной в качестве неподвижной. В общем случае для этого нужно задать  $3N$  степеней свободы, где  $N$  — число материальных точек, на которые разделены тела.

Однако можно выделить частный, но широко распространенный случай — твёрдое тело. Реальное твёрдое тело подвержено *деформациям* (см. разд. 6.1). Поэтому для упрощения задачи будем рассматривать абсолютно твёрдое тело, не подверженное деформациям.

**Абсолютно твёрдое тело** — тело, расстояние между двумя любыми точками которого всегда остается неизменным (это понятие применимо, когда можно пренебречь *деформацией* тела).

Здесь мы опять вводим абстракцию, поскольку абсолютно твердых тел в природе не существует. Однако данная абстракция позволяет отвлечься от несущественных для рассматриваемого явления деталей — малых деформаций реальных твердых тел.

**Центром масс тела** называют точку, через которую должно проходить направление действия силы, вызывающей движение тела. В однородном поле тяготения центр масс совпадает с центром тяжести. Поэтому положение центра масс тела можно найти путем последовательного подвешивания его за несколько точек и определяя точку пересечения вертикальных линий (рис. 107).

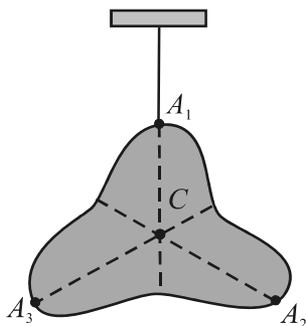


Рис. 107. Определение положения центра масс  $C$  тела.

$A_1, A_2, A_3$  — точки подвеса



**Центром тяжести** называют связанную с твердым телом точку, через которую проходит равнодействующая сил тяжести, действующая на частицы этого тела при любом положении тела в пространстве, если эта точка существует. Центр тяжести тела совпадает с центром масс. Однако понятие "центр масс" более общее, в частности, центр масс есть у любого тела, а центр тяжести — лишь у тел, находящихся в однородном поле тяжести.

## 9.2. Поступательное, вращательное и плоское движение

**Поступательное движение** — движение твердого тела, при котором прямая, соединяющая две любые точки тела, остается параллельной своему начальному направлению (рис. 108).

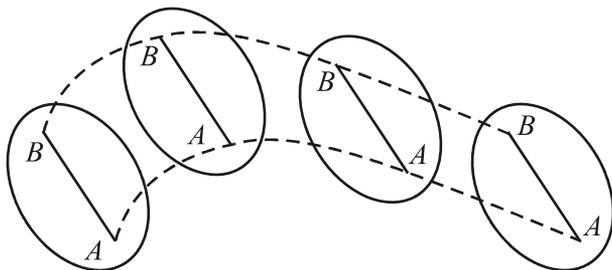


Рис. 108. Поступательное движение

При поступательном движении все точки тела описывают одинаковые (при наложении совпадающие) траектории и имеют в каждый момент времени одинаковые по модулю и направлению скорости и ускорения. Поэтому изучение поступательного движения твердого тела фактически сводится к задаче кинематики любого элемента тела (точки) и большой сложности не представляет.



Исследуя поведение тела, движущегося поступательно, можно считать, что масса тела сосредоточена в одной точке. К этой точке можно прикладывать все силы, действующие на тело. Размеры и форма тела на его движение не влияют.

**Вращательное движение твердого тела вокруг неподвижной оси** — движение твердого тела, при котором какие-либо две его точки остаются все время неподвижными. Прямая, проходящая через эти точки, называется **осью вращения**; все точки тела при вращательном движении описывают окружности в плоскостях, перпендикулярных к оси вращения и с центрами, лежащими на этой оси.

Любой радиус, проведенный от оси вращения до произвольной точки, за определенный промежуток времени повернется на один и тот же угол. Следовательно, угол поворота произвольного радиуса является характеристикой вращающегося твердого тела, аналогичной длине пути тела, движущегося поступательно. Если за определенный промежуток времени угол поворота  $\varphi$  для всех точек одинаковый, то и *угловая скорость* для всех точек тоже одинаковая. Угловая скорость определяется выражением (53). Связь между линейной  $v$  и угловой  $\omega$  скоростью произвольной точки вращающегося тела, которая движется по окружности радиусом  $r$ , задается формулой:

$$v = \omega r. \tag{261}$$

Если угловая скорость  $\omega$  изменяется, то:

$$\Delta v = \Delta(\omega r). \tag{262}$$

Разделим обе части равенства (262) на достаточно малый промежуток времени  $\Delta t$ :

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{\Delta(\omega r)}{\Delta t}, \quad \frac{\Delta v}{\Delta t} = r \frac{\Delta \omega}{\Delta t}. \quad (263)$$

В равенствах (263) слева — тангенциальное ускорение точки, движущейся по окружности радиусом  $R$ , т. е.  $a_\tau = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ . Справа величина  $\frac{\Delta \omega}{\Delta t}$  представляет собой угловое ускорение тела:

$$\beta = \frac{\Delta \omega}{\Delta t}. \quad (264)$$

**Угловое ускорение**  $\beta$  по модулю равно производной угловой скорости  $\omega$  по времени  $t$ , т. е.  $\beta = \frac{d\omega}{dt}$ . Напомним, что угловая скорость  $\omega$  представляет собой псевдовектор, лежащий вдоль оси вращения, причем ориентация его связана с направлением вращения правилом правого винта, а модуль угловой скорости равен углу поворота тела за единицу времени. Таким образом, в случае неподвижной оси вектор углового ускорения  $\beta = \frac{d\omega}{dt}$  направлен так же, как и вектор угловой скорости  $\omega$ , если скорость вращения возрастает, и направлен в противоположную сторону, если скорость вращения убывает.

Основные кинематические характеристики вращательного движения тела — его угловая скорость  $\omega$  и угловое ускорение  $\beta$ . Для любой точки тела, отстоящей от оси на расстоянии  $r$ , ее линейная скорость  $v = r\omega$ , касательное (тангенциальное) ускорение  $a_\tau = r\beta$ , нормальное ускорение  $a_n = r\omega^2$  и полное ускорение  $a = r\sqrt{\beta^2 + \omega^4}$ .

Связь между линейным и угловым ускорением дается формулой (263) или:

$$a = \beta r. \quad (265)$$

Учитывая (263) и то, что  $\Delta \omega = \omega - \omega_0$ :

$$\omega = \omega_0 + \beta t, \quad (266)$$

что аналогично выражению для линейной скорости  $v = v_0 + at$ .

Если угол поворота радиуса выражать в радианах, то для произвольной точки длина дуги при повороте радиуса на угол  $\varphi$  будет равна  $l = \varphi r$ . Но  $l$  представляет собой длину пути, которую при равноускоренном движении можно представить следующим образом:

$$l = v_0 t + \frac{at^2}{2}. \tag{267}$$

Подставляя значения:  $l = \varphi r$ ,  $v_0 = \omega_0 r$ ,  $a = \beta r$  и сокращая на  $r$ , получаем:

$$\varphi = \omega_0 t + \frac{\beta t^2}{2}. \tag{268}$$

Выражение (268) определяет угол поворота радиуса произвольной точки, иначе говоря, **угол поворота вращающегося тела**.

Соотношение кинематических характеристик поступательного и вращательного движений приведено в табл. 21.

**Плоское движение** — комбинация поступательного и вращательного движений.

**Таблица 21.** Соотношение кинематических характеристик поступательного и вращательного движений

Поступательное движение		Вращательное движение	
Перемещение $S$	м	Угол поворота $\varphi$	рад
Линейная скорость $v$	м·с <sup>-1</sup>	Угловая скорость $\omega = \frac{\varphi}{t} = \frac{v}{r}$	рад·с <sup>-1</sup>
Линейное ускорение $a$	м·с <sup>-2</sup>	Угловое ускорение $\beta = \frac{a}{r}$	рад·с <sup>-2</sup>
$v = v_0 + at$		$\omega = \omega_0 + \beta t$	
$S = v_0 t + \frac{at^2}{2}$		$\varphi = \omega_0 t + \frac{\beta t^2}{2}$	

### 9.3. Вращательное движение абсолютно твердого тела вокруг неподвижной оси

Рассмотрение вращательного движения наряду с ранее уже введенными физическими параметрами (*угол поворота, угловая скорость, угловое ускорение*) требует введения совершенно новых, специфичных для вращательного движения, параметров.

Вращательное действие силы зависит не только от самой силы, но и от точки ее приложения, т. е. "плеча", и распределения массы относительно оси вращения.

**Момент силы** — величина, характеризующая вращательный эффект силы; имеет размерность произведения длины на силу.

Различают момент силы относительно центра (точки) и относительно оси.

**Момент силы (вращающий момент)  $M$  относительно неподвижной оси** определяется *векторным произведением*  $M = [\mathbf{r}, \mathbf{F}]$ , где  $\mathbf{F}$  — вектор силы, лежащий в плоскости вращения,  $\mathbf{r}$  — радиус-вектор в той же плоскости, направленный от оси вращения к точке приложения силы  $\mathbf{F}$  (рис. 109). Вектор  $M$  параллелен оси вращения, направление его совпадает с направлением поступательного движения правого винта (буравчика) при его вращении от  $\mathbf{r}$  к  $\mathbf{F}$ . По модулю момент силы  $M = rF \sin(\mathbf{r}, \mathbf{F})$ .

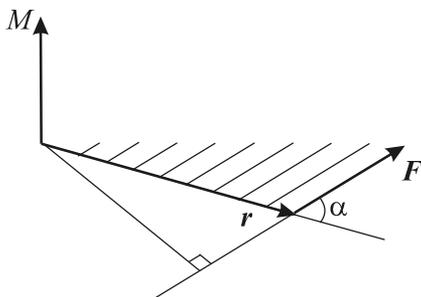


Рис. 109. Взаимное расположение векторов

**Момент силы относительно точки** — векторная величина, равная *векторному произведению* радиус-вектора, проведенного из центра в точку приложения силы, на силу (рис. 110).

Рассмотрим движение материальной точки вокруг неподвижной оси с угловой скоростью  $\omega$ . Пусть  $\mathbf{r}$  — радиус-вектор материальной точки (от оси вращения), а  $m$  — ее масса. Тогда линейная скорость этой точки:

$$\mathbf{v} = [\omega \mathbf{r}], \quad (269)$$

а **момент импульса относительно оси вращения** — псевдовектор  $L$ :

$$L = [\mathbf{r} m \mathbf{v}]. \quad (270)$$



Момент импульса (кинетический момент, момент количества движения, орбитальный момент, угловой момент) материальной точки отно-

сительно центра вращения — псевдовектор, равный векторному произведению радиус-вектора точки, проведенного из центра, на ее количество движения.

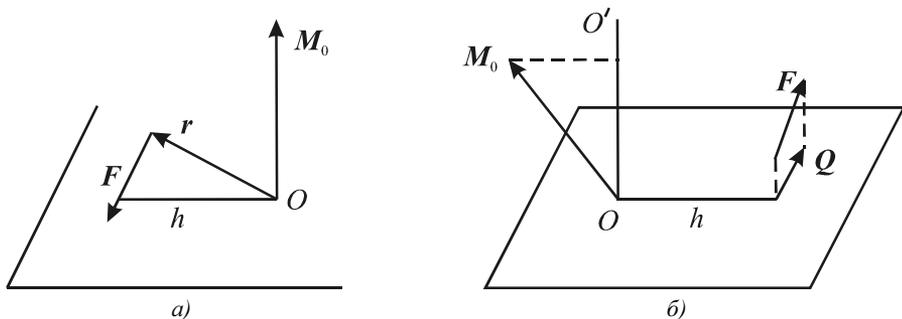


Рис. 110. Момент силы относительно центра  $O$  (а) и момент силы относительно оси  $OO'$  (б)

Момент силы  $M$  относительно неподвижной оси вращения равен отношению изменения момента импульса относительно этой оси вращения ко времени, за которое произошло это изменение:

$$M = \frac{\Delta L}{\Delta t} \Rightarrow M = \frac{dL}{dt}. \quad (271)$$

Ранее мы отмечали, что сила действия одного тела на второе равна силе действия второго тела на первое, и эти силы направлены противоположно. Роль силы в случае вращения будет играть момент силы, роль скорости — угловая скорость, роль массы — момент инерции.

**Второй (основной) закон динамики для вращательного движения**, сходный со *вторым законом Ньютона* (69) — уравнение моментов для вращения вокруг неподвижной оси:

$$M = I\beta, \quad (272)$$

$M$  — момент силы,  $\beta$  — угловое ускорение.

Ранее мы определили *абсолютно твердое тело* как систему материальных точек, расстояние между которыми при движении не изменяется (т. е. систему жестко связанных между собой материальных точек). При движении вокруг неподвижной оси все материальные точки, образующие твердое тело, вращаются с одинаковой угловой скоростью  $\omega$ . Пусть  $r_i$  — радиус-вектор  $i$ -й материальной точки тела (от оси вращения), а  $m_i$  — ее масса (рис. 111).

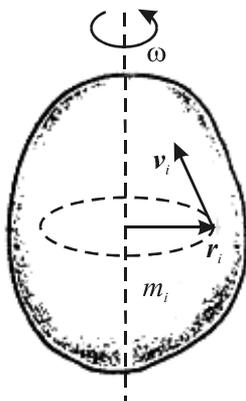


Рис. 111. Вращение твердого тела вокруг неподвижной оси

Скалярная величина  $I$ , характеризующая инертность тела при непоступательном движении и зависящая от распределения масс в теле, называется **моментом инерции тела** относительно оси вращения:

$$I_i = m_i r_i^2, \quad (273)$$

где  $r_i$  — расстояние точки  $i$  от оси вращения.

Сумма моментов инерции точек называется **моментом инерции тела относительно выбранной оси вращения**.

Единицей момента инерции является  $1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .



Момент силы  $M$ , приложенной к телу, равен произведению углового ускорения  $\beta$  на момент инерции  $I$  тела относительно оси вращения.

**Момент импульса  $L$  твердого тела** является векторной величиной (псевдовектором). Он складывается из моментов импульса всех образующих это тело материальных точек:

$$L = \sum_i L_i = \left( \sum m_i r_i^2 \right) \omega, \quad (274)$$

$$L = I \omega, \quad (275)$$

где  $I = \sum m_i r_i^2$  — момент инерции твердого тела относительно оси вращения.

$$L = I \omega = \sum_i r_i^2 m_i \omega. \quad (276)$$

**Главный момент импульса системы** относительно центра вращения равен геометрической сумме моментов импульса всех точек системы относительно того же центра.

Под действием приложенных к телу внешних сил его момент импульса (275) изменяется со скоростью:

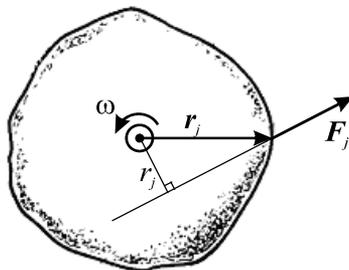
$$\frac{dL}{dt} = M_{внеш}, \quad (277)$$

где  $M_{внеш}$  — сумма моментов внешних сил, приложенных к телу:

$$M_{внеш} = \sum_j M_j = \sum_j F_j r_j, \quad (278)$$

где  $M_j = F_j r_j$  — момент силы относительно оси вращения  $j$ -й внешней силы, приложенной к телу;  $F_j$  — проекция этой силы на плоскость, перпендикулярную оси вращения тела;  $r_j$  — плечо этой силы (рис. 112).

Сумму моментов внешних сил, действующих на материальные точки системы, относительно некоторой неподвижной точки называют **главным моментом сил**.



**Рис. 112.** Вращение твердого тела под действием внешних сил

Соотношение динамических характеристик поступательного и вращательного движений приведено в табл. 22.

**Таблица 22.** Соотношение динамических характеристик поступательного и вращательного движений

Поступательное движение		Вращательное движение	
Масса $m$	кг	Момент инерции $I$	кг·м <sup>2</sup>
Импульс $p = mv$	кг·м·с <sup>-1</sup>	Момент импульса $L = I\omega$	Дж·с
Сила $F$	Н	Момент силы $M$	Н·м

Таблица 22 (окончание)

Поступательное движение	Вращательное движение
Второй закон Ньютона: $F = ma$	Второй (основной) закон динамики для вращательного движения: $M = I\beta$
Работа постоянной силы: $A = FS$	Работа при постоянном вращающем моменте: $A = M\varphi$

### Контрольные вопросы

- ? Что называется моментом инерции тела? От чего зависит эта величина?
- ? Что такое радиус-вектор?
- ? Что называется моментом силы? Как направлен этот вектор?
- ? В каких единицах измеряются вращательный момент силы и момент инерции твердого тела?
- ? Напишите основной закон динамики для вращательного движения.

## 9.4. Законы сохранения при вращательном движении

Основной закон динамики для вращательного движения можно переписать следующим образом:

$$M = I \frac{d\omega}{dt}, \quad (279)$$

при этом в данном случае  $M$  — среднее значение момента внешних сил за бесконечно малый промежуток времени  $dt$ . Умножив обе части равенства на  $dt$ , получим:

$$Mdt = Id\omega = I\omega_2 - I\omega_1 \Rightarrow \quad (280)$$

$$\Rightarrow Mdt = d(I\omega). \quad (281)$$

Если внешние силы отсутствуют (*замкнутая система*) или таковы, что их суммарный момент равен нулю ( $M = 0$ ), то:

$$I\omega = \text{const}. \quad (282)$$

Следствием этого является **закон сохранения момента импульса**, аналогичный *закону сохранения импульса*: полный момент импульса в замкнутой системе тел ( $F = 0$ ,  $M = 0$ ) есть величина постоянная:

$$\frac{dL}{dt} = 0 \Rightarrow L = I\omega = \text{const}, \quad (283)$$

то есть момент импульса вращающегося тела остается постоянным, если момент внешних сил, действующих на тело, равен нулю.

Следствием этого закона являются *гироскопический эффект* и опыт со скамьей Жуковского. **Скамья Жуковского** представляет собой вращающийся стул, сиденье которого имеет форму диска. Демонстратор садится на скамью. Ему передают быстро вращающееся колесо с вертикально направленной осью. В начале опыта весь вращательный импульс сосредоточен в колесе. Затем демонстратор наклоняет ось колеса. В результате скамья вместе с демонстратором приходит во вращение. Наклоняя ось колеса, демонстратор во время ее движения испытывает силы бокового давления (колесо стремится вырваться из рук демонстратора). Эти силы направлены горизонтально и перпендикулярно как к оси колеса, так и к оси скамьи. Их геометрическая сумма равна нулю, но они имеют момент относительно вертикальной оси. Этот момент сил и приводит во вращение скамью и демонстратора.

Если на тела системы действуют только внутренние силы и внутренние моменты силы, то момент импульса силы не изменяется. Это значит, что если внутри системы возникло вращение, появился момент импульса, то обязательно внутри той же системы должно возникнуть вращение других ее частей в противоположном направлении так, чтобы общий момент импульса оставался равным нулю. Изменение главного момента количества движения системы происходит только в результате внешних воздействий и зависит от главного момента внешних сил.



---

Если *главный момент внешних сил* относительно какого-нибудь центра или оси равен нулю, то главный момент импульса системы относительно этого центра или оси остается величиной постоянной, т. е. имеет место закон сохранения момента импульса.

---

☞ Земля вращается вокруг своей оси. На Землю действует внешняя сила притяжения к Солнцу, вокруг которого также вращается Земля. Эта сила приложена к центру Земли и проходит через ось вращения, следовательно, плечо и момент этой силы равны нулю. Поэтому момент импульса Земли остается постоянным. Если бы момент инерции Земли не изменялся, то угловая скорость вращения Земли была бы постоянной. Однако масса и момент инерции Земли возрастают, и угловая скорость ее уменьшается примерно на 0,57 с за 100 лет. □

Чтобы заставить тело вращаться, необходимо совершить работу. Следовательно, вращающееся тело обладает кинетической энергией, которая равна

сумме кинетических энергий всех составляющих частиц тела, движущихся по окружностям радиусами  $r_i$ , т. е.:

$$E_{Кер} = \sum_i \frac{m_i v_i^2}{2}, \quad (284)$$

где  $E_{Кер}$  — кинетическая энергия тела, вращающегося вокруг неподвижной оси.

Учитывая (271) ( $v_i = \omega r_i$ ) и то, что угловая скорость одинакова для всех частиц, получаем математическую форму записи **кинетической энергии тела, вращающегося вокруг неподвижной оси**:

$$E_{Кер} = \frac{I\omega^2}{2}, \quad (285)$$

где  $I$  — *момент инерции* тела относительно неподвижной оси.

При действии постоянного вращающего момента силы совершается работа, которая приводит к изменению угловой скорости и изменению кинетической энергии:

$$A = \frac{I\omega_2^2}{2} - \frac{I\omega_1^2}{2}. \quad (286)$$

Если тело не только вращается вокруг оси, но и движется поступательно (т. е. совершает *плоское движение* — например, шар движется по наклонной плоскости), то работа внешних сил может привести как к изменению кинетической энергии вращательного движения, так и к изменению кинетической энергии поступательного движения:

$$A = \Delta E_{Кер} + \Delta E_{Kn} = \Delta (E_{Кер} + E_{Kn}) = \Delta E_K, \quad (287)$$

где  $E_K$  — полная кинетическая энергия тела:

$$E_K = \frac{mv^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2}. \quad (288)$$




---

Полная кинетическая энергия поступательно движущегося в пространстве и вращающегося вокруг оси тела равна сумме кинетической энергии поступательного движения его центра масс и его кинетической энергии вращательного движения относительно центра масс.

---

Аналогия между законами сохранения для поступательного и вращательного движений приведена в табл. 23.

**Таблица 23.** Аналогия между законами сохранения для поступательного и вращательного движений

Поступательное движение	Вращательное движение
Закон сохранения импульса: $\sum m_i v_i = \text{const}$	Закон сохранения момента импульса: $I\omega = \text{const}$
Кинетическая энергия тела при поступательном движении: $E_{\text{Кп}} = \frac{mv^2}{2}$	Кинетическая энергия тела при вращательном движении: $E_{\text{Квр}} = \frac{I\omega^2}{2}$

**Контрольные вопросы**

- ? Каким образом фигуристы могут изменять скорость вращения в "волчке"?
- ? Сформулируйте закон сохранения и превращения механического движения с учетом вращения.

## 9.5. Теорема Гюйгенса—Штейнера

Момент инерции тела зависит от выбора оси вращения. Однако это не значит, что для всякой новой оси момент инерции  $I$  следует вычислять заново, пользуясь формулой (276).

Пусть момент инерции твердого тела относительно оси  $C$ , проходящей через его центр инерции, известен и равен  $I_C$ . Можно показать, что относительно оси  $AA$ , параллельной оси  $CC$  (рис. 113), он равен:

$$I_A = I_C + ml^2, \tag{289}$$

где  $m$  — масса твердого тела;  $l$  — расстояние между осями.

Выражение (289) представляет собой **теорему Гюйгенса—Штейнера (теорему Штейнера)**:

Момент инерции относительно произвольной оси равен сумме момента инерции относительно оси, параллельной данной и проходящей через центр масс тела, и произведения массы тела на квадрат расстояния между осями.



Теорема Штейнера сводит вычисление момента инерции относительно произвольной оси к вычислению момента инерции относительно оси, проходящей через центр масс тела.

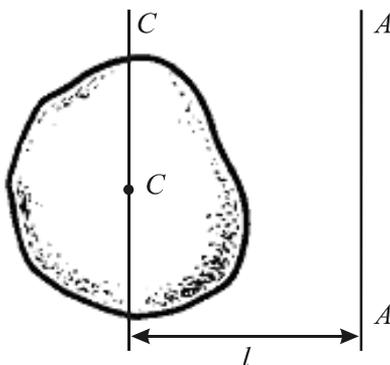


Рис. 113. К теореме Гюйенса—Штейнера

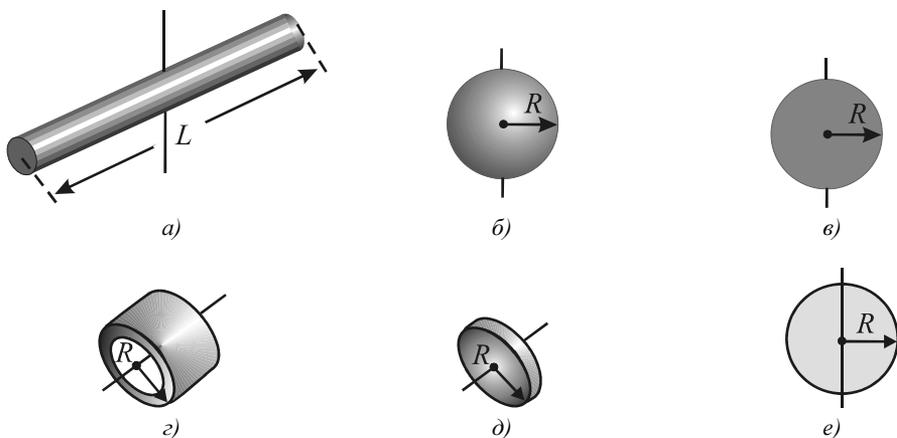
Приведем значения моментов инерции для некоторых тел (тела предполагаются однородными, масса тела —  $m$ ).

Суммирование в (276) проводится по всем материальным точкам, образующим тело. Практически вычисление такой суммы сводится к вычислению соответствующего интеграла, что для однородных тел симметричной формы, когда ось вращения совпадает с осью симметрии (проходит через центр массы), обычно является несложной задачей. Так, в случае тонкого стержня длины  $l$  относительно оси, перпендикулярной к стержню и проходящей через его середину, момент инерции равен  $I_C = \frac{ml^2}{12}$ ; тонкого стержня длины  $l$  относительно оси, перпендикулярной к стержню и проходящей через его конец, —  $I_C = \frac{ml^2}{12} + m\left(\frac{l}{2}\right)^2 = \frac{ml^2}{3}$ ; тонкостенного цилиндра (обруча) относи-

тельно оси, совпадающей с осью трубы, —  $I_C = mR^2$ ; сплошного цилиндра (диска) относительно оси, перпендикулярной к плоскости диска и проходящей через его центр, —  $I_C = \frac{1}{2}mR^2$ ; шара относительно оси, совпадающей с диаметром, —  $I_C = \frac{2}{5}mR^2$  (рис. 114); тонкого диска (толщина диска во много раз меньше радиуса диска) —  $I_C = \frac{1}{4}mR^2$ ; круглого цилиндра длины  $l$  относительно оси, перпендикулярной к оси цилиндра и проходящей через его се-

редину, —  $I_C = m\left(\frac{l^2}{12} + \frac{R^2}{4}\right)$ ; прямоугольного параллелепипеда размерами  $2a$ ,

$2b, 2c$  относительно оси, проходящей через центр и параллельной ребру длины  $2a$ , —  $I_C = m \frac{b^2 + c^2}{3}$ , во всех формулах  $R$  — радиус обруча, цилиндра, шара или сферы. Определение момента инерции тел сложной конфигурации связано с большими математическими трудностями, поэтому их часто определяют опытным путем.



**Рис. 114.** Моменты инерции некоторых тел: (а) — твердого стержня  $I_C = \frac{1}{12}mL^2$ ;

(б) — шара  $I_C = \frac{2}{5}mR^2$ ; (в) — тонкостенной сферической оболочки  $I_C = \frac{2}{3}mR^2$ ;

(г) — тонкостенного цилиндра  $I_C = mR^2$ ; (д) — диска  $I_C = \frac{1}{2}mR^2$ ;

(е) — тонкого диска  $I_C = \frac{1}{4}mR^2$

### Контрольные вопросы

? Как определить момент инерции тела относительно данной оси, если известен момент инерции тела относительно оси, проходящей через центр инерции тела, параллельно данной оси?

? Сформулируйте теорему Гюйгенса—Штейнера.

## 9.6. Гироскоп

**Гироскоп**<sup>1</sup> — быстровращающееся симметричное массивное твердое тело, полный момент импульса которого  $L = I\omega$  в замкнутой системе сохраняется неизменным. Гироскоп изобрел Фукó.

Простейший гироскоп — волчок. Чем массивнее волчок и чем быстрее он вращается, тем труднее изменить направление его оси. В этой своеобразной инертности волчка заключается гироскопический эффект. Земной шар тоже своеобразный волчок — он вращается вокруг своей оси очень медленно, в десятки тысяч раз медленнее, чем волчок. Однако медленность вращения "земного волчка" с лихвой компенсируется его колоссальной массой. Поэтому гироскопический эффект для Земли очень велик.



Если твердое тело вращается с большим моментом импульса относительно оси, совпадающей с осью геометрической симметрии тела, то для заметного изменения ориентации оси вращения в пространстве оказывается необходимым прикладывать очень большие внешние силы.

В гироскопических приборах в качестве гироскопа обычно применяют ротор быстроходного электродвигателя постоянного или переменного тока, статор которого укреплен в кожухе, являющемся внутренним кольцом карданова подвеса, обеспечивающего три степени свободы.

Если центр тяжести гироскопа совпадает с центром подвеса, то гироскоп называют **астиатическим (уравновешенным)**, в противном случае — **тяжелым (неуравновешенным)**. Астиатический гироскоп, свободный от внешних воздействий, устойчиво сохраняет первоначальное направление своей оси.

Под действием внешних сил, момент которых  $M$  относительно точки подвеса гироскопа отличен от 0, происходит прецессия гироскопа.

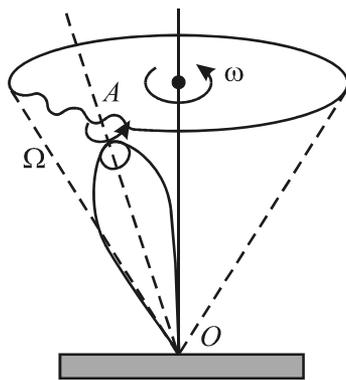
**Прецессия**<sup>2</sup> — движение оси вращения твердого тела, вращающегося около неподвижной точки, в частности гироскопа, при котором она описывает круговую коническую поверхность (рис. 115). Суть прецессии состоит в том, что давление, оказываемое на ось вращающегося волчка, заставляет эту ось перемещаться в направлении, перпендикулярном к действующей силе.

Пример прецессии — медленное движение оси вращения Земли по круговому конусу. Ось этого конуса перпендикулярна плоскости земной орбиты, а угол

<sup>1</sup> От греч. *gyros* — круг; *gyreuo* — кружусь, вращаюсь; *skopeo* — смотрю, наблюдаю.

<sup>2</sup> Позднелат. *praecessio* — движение впереди, от лат. *praecedo* — иду впереди, предшествую.

между осью и образующей конуса равен  $23^{\circ}27'$ . Период прецессии оси вращения Земли равен приблизительно 26 тыс. лет. Вследствие прецессии точка весеннего равноденствия движется по эклиптике навстречу кажущемуся годовичному движению Солнца (предварение равноденствия), проходя  $50,24''$  в год; полюс мира перемещается между звездами; экваториальные координаты звезд непрерывно изменяются. Одновременно с прецессионным движением земная ось испытывает нутационные колебания. Если бы Земля была идеальным однородным шаром, прецессии бы не существовало. Но Земля сплюснута у полюсов и вытянута в своей экваториальной зоне, причем плоскость земного экватора наклонена как к плоскости лунной орбиты, так и к плоскости орбиты Земли.



**Рис. 115.** Прецессионное движение волчка (гироскопа) по круговому конусу:  
 $OA$  — ось собственного вращения волчка с частотой  $\Omega$ ,  
 $\omega$  — угловая скорость прецессии

**Нутация**<sup>1</sup> — колебательное движение оси собственного вращения тела, происходящее одновременно с прецессией, при котором изменяется угол между осью собственного вращения тела и осью, вокруг которой происходит прецессия.

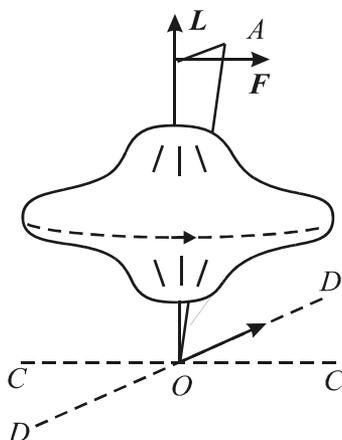
Пример нутации — небольшие колебания земной оси, налагающиеся на ее прецессионное движение и обусловленные притяжением Солнца и Луны.

Прецессия без нутационных колебаний называется **регулярной прецессией**.

Рассмотрим гироскоп (волчок), ось которого закреплена одним концом в шарнире, вокруг которого она вращается без трения произвольным образом (рис. 116). Попытаемся повернуть ось гироскопа в каком-нибудь одном направлении, например, вокруг оси  $DD$ , подействовав на свободный конец оси силой  $F$  в течение времени  $dt$ . Однако ось гироскопа повернется не вокруг

<sup>1</sup> От лат. *nutatio* — колебание.

оси  $DD$ , а вокруг оси  $CC$ , приняв положение  $OA$ . Это явление называется **гироскопическим эффектом**.



**Рис. 116.** Волчок (гироскоп), ось которого закреплена одним концом в шарнире

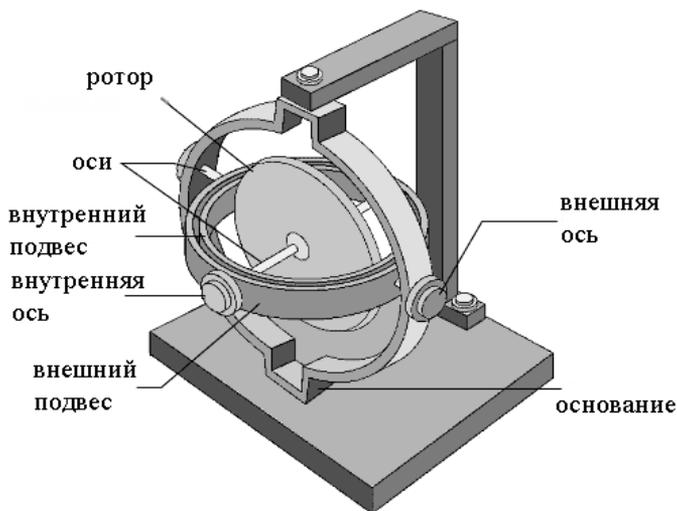
Гироскопический эффект является причиной того, что хорошо раскрученный волчок не опрокидывается под действием силы тяжести. Это действие приводит лишь к тому, что ось волчка поворачивается, описывая конус (это движение и называется прецессией). Только когда вследствие трения вращение волчка заметно замедлится, он опрокинется и займет положение, соответствующее минимуму потенциальной энергии.

Под действием внешних сил гироскоп может совершать движения, которые кажутся на первый взгляд неожиданными и противоречащими интуиции. На рис. 117 изображен гироскоп в кардановом подвесе, допускающем поворот оси массивного ротора вокруг трех взаимно перпендикулярных осей, пересекающихся в его центре масс. На ось гироскопа подвешен маленький шарик. Если бы маховик гироскопа не вращался, то наблюдалось бы привычное явление: шарик опускался бы под действием собственного веса. Иначе происходит, когда маховик гироскопа приведен в быстрое вращение. В этом случае шарик опускаться не будет, а будет двигаться вместе с гироскопом по окружности в горизонтальной плоскости. Такое вращение называется **вынужденной прецессией**.

Движение гироскопа является следствием основного уравнения динамики вращательного движения (273):

$$\mathbf{M} = \frac{d\mathbf{L}}{dt}, \quad (290)$$

где  $\mathbf{M}$  — вектор момента сил;  $t$  — время;  $\mathbf{L}$  — вектор момента импульса.



**Рис. 117.** Гироскоп в кардановом подвесе, допускающем поворот оси массивного ротора вокруг трех взаимно перпендикулярных осей, пересекающихся в его центре масс

Прецессия гироскопа будет происходить по отношению к ИСО с угловой скоростью:

$$\omega = \frac{M}{I\Omega}, \tag{291}$$

где  $I$  — момент инерции гироскопа относительно вертикальной оси;  $\Omega$  — угловая скорость собственного вращения гироскопа относительно той же оси.

Величина:

$$H = L = I\Omega \tag{292}$$

называется **собственным кинетическим моментом гироскопа**.

Прецессия происходит тем медленнее, чем больше  $\Omega$ . На практике величина  $\omega$  бывает в миллионы раз меньше  $\Omega$ .

В приближенной теории гироскопа пренебрегают моментом импульса, связанным с медленной прецессией гироскопа, и считают, что момент импульса полностью определяется вращением маховика (т. е. самого тела гироскопа).

С другой стороны, момент сил  $M$ , действующих на гироскоп, равен:

$$M = [r F], \tag{293}$$

то есть представляет собой векторное произведение радиус-вектора  $r$ , проведенного из центра гироскопа к точке приложения силы  $F = mg$ , где  $m$  — масса грузика;  $g$  — вектор ускорения свободного падения.

Момент количества движения  $L$  изменяется только вследствие прецессии гироскопа с угловой скоростью  $\omega$ . Поэтому:

$$\frac{dL}{dt} = [\omega L]. \quad (294)$$

Окончательно получаем:

$$[\omega I\Omega] = -[mg r]. \quad (295)$$

Так как вектор  $\Omega$  сонаправлен вектору  $r$ , мы можем записать:

$$\omega = -\frac{rm}{I\Omega} g. \quad (296)$$

Следовательно, маховик гироскопа будет совершать медленное вращение (прецессию) в горизонтальной плоскости, причем угловая скорость прецессии тем больше, чем больше масса подвешенного грузика. Приведенные рассуждения справедливы при условии  $\Omega \ll \omega$ , т. е. для быстро вращающегося гироскопа.

Основные задачи, решаемые гироскопическими приборами — определение курса, создание искусственного горизонта, определение абсолютной угловой скорости и углового ускорения, уменьшение влияния качки на точность стрельбы и в устройствах стабилизации для автоматического управления движением самолетов, судов, торпед, ракет и т. п.

**Гиростабилизатор**<sup>1</sup> — устройство для поддержания неизменным положения платформы (корпуса, площадки, элемента прибора) относительно заданных направлений с помощью гироскопов и вспомогательных приводов (разгрузочных или следящих). Различают одноосные, двухосные и трехосные гиростабилизаторы, в которых стабилизируемая платформа имеет одну, две или три степени свободы относительно движущегося аппарата (например, самолета).

В одноосном гиростабилизаторе ось ротора гиromотора удерживается в направлении, перпендикулярном к плоскости наружной рамки карданова подвеса. При внешнем воздействии на гиростабилизатор момента происходит прецессия оси ротора, в результате чего внутренняя рамка поворачивается вокруг своей оси. Сигнал от датчика поворота (установленного на оси внутренней рамки) поступает в приводное устройство (расположенное на оси гиростабилизатора), которое развивает момент, который противодействует действующему. При этом ось ротора сохраняет свое первоначальное положение относительно наружной рамки.

<sup>1</sup> От греч. *gyroō* — кружусь, вращаюсь и лат. *stabilis* — устойчивый, неизменный, постоянный.

В двухосном гиросtabilизаторе платформа имеет две степени свободы (на внутренней рамке закреплены два ротора, оси которых перпендикулярны).

Трехосные гиросtabilизаторы служат для угловой стабилизации различных устройств в пространстве. Трехосные гиросtabilизаторы применяют в качестве чувствительных устройств автопилотов курса, крена летательных аппаратов, для стабилизации антенн головок самонаведения. Платформа, на которой закреплено уже три гиросмотора, имеет три степени свободы. При повороте рамок гиросмоторов включаются разгрузочные приводы (те самые, которые развивают противодействующие моменты), при этом платформа сохраняет устойчивое первоначально заданное положение в пространстве, не зависящее от поворотов аппарата, на котором установлен гиросtabilизатор.

Гироскоп с горизонтальной осью вращения сохраняет свое постоянное положение относительно любого ориентира на Земле. Самолет может поворачиваться вокруг гироскопа и может быть поставлен относительно него в разные положения по направлению; однако самолет ставится гироскопом всегда в одно и то же положение относительно выбранного ориентира, указываемого компасом. Во время работы гироскоп с вертикальной осью вращения имеет только одно положение относительно земли, т. е. его вертикальная ось всегда направлена к центру земного шара. Поэтому если в положении самолета относительно гироскопа будут боковые или продольные крены, то они будут соответствовать таким же изменением положения самолета относительно Земли.

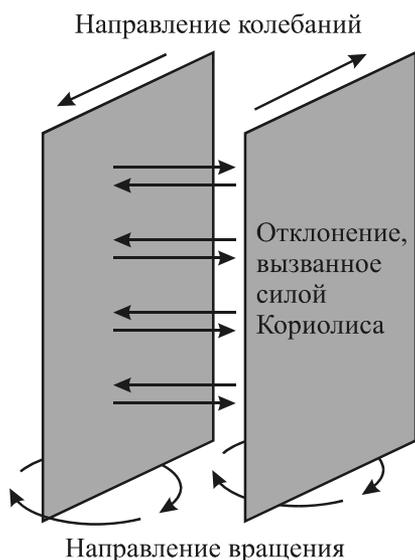


Рис. 118. Колебательный твердотельный гироскоп

В **колебательном гироскопе** (рис. 118) нет вращающихся частей. Он основан на наличии *силы Кориолиса* и представляет собой колеблющуюся пластину (обычно треугольную призму из пьезоэлектрика). Если пластину повернуть, то за счет силы Кориолиса она отклонится в плоскости, перпендикулярной первоначальной плоскости колебаний. Измеряя это отклонение с помощью сигналов, снимаемых с электродов на гранях, и обрабатывая полученные данные, можно получить скорость вращения вокруг одной оси. Если нужно отслеживать вращение в нескольких плоскостях, используют несколько соответственно расположенных гироскопов.

# ГЛАВА 10

## Основы релятивистской механики

Сегодня в полдень пущена ракета.  
Она летит куда скорее света.  
И долетит до цели в семь утра  
Вчера.

*Английская эпиграмма*

### 10.1. Специальная теория относительности

Ведь даже Эйнштейн — физический гений —  
Весьма относительно все понимал...  
Вот уж действительно — все относительно,  
Все-все, все!

*В. С. Высоцкий, Все относительно (июнь 1966 г.)*

В предыдущих главах, посвященных классической механике, мы ввели понятия *траектории*, *скорости*, *ускорения* и *силы*, значения которых и направления изменялись во времени. Применяя *инерциальные системы отсчета*, мы убедились, что основные законы механики — *законы Ньютона* — с достаточной точностью выполняются только в таких системах, которые покоятся в абсолютном пространстве или движутся относительно него равномерно и прямолинейно.

Со времен Ньютона считалось, что все *системы отсчета* представляют собой набор жестких "стержней", позволяющих устанавливать положение тел в пространстве. Конечно, в каждой системе отсчета такие тела выбирались по своему. Вместе с тем принималось, что у всех наблюдателей одно и то же абсолютное время. Это предположение казалось интуитивно настолько очевидным, что специально не оговаривалось. В повседневной практике на Земле это предположение подтверждается всем нашим опытом.

В механике Ньютона одновременность двух событий абсолютна и не зависит от *системы отсчета*. Это значит, что если два события происходят в системе

$K$  в моменты времени  $t$  и  $t_1$ , а в системе  $K'$  соответственно в моменты времени  $t'$  и  $t'_1$ , то, поскольку  $t = t_1$ , промежуток времени между двумя событиями одинаков в обеих системах отсчета:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = t'_2 - t'_1 = \Delta t'. \quad (297)$$

По мере развития таких разделов физики, как, в частности, оптика и электродинамика, возник вопрос: распространяется ли *принцип относительности Галилея* и на другие немеханические явления? Если нет, то с помощью этих немеханических явлений можно было бы различить инерциальные системы одну от другой и выбрать главную из них — абсолютную.

Одним из таких немеханических явлений, как считали, может быть распространение света. По Ньютону, скорость света, измеренная в инерциальной системе отсчета, должна зависеть от относительной скорости движения источника и приемника. По образному выражению Эйнштейна, если "*бежать навстречу свету*", то его относительная скорость должна возрасти, а если "*убежать от света*", то она должна уменьшиться. В результате, в XIX в. у физиков, строивших теорию оптических и электромагнитных явлений по аналогии с теорией *упругости* (см. разд. 6.1), сложилось ложное представление о необходимости существования абсолютной неподвижной системы отсчета, связанной со светоносной средой — неподвижным эфиром<sup>1</sup>. Зародилось, таким образом, представление об абсолютном движении относительно системы, связанной с эфиром, представление, противоречащее более ранним воззрениям классической механики (*принцип относительности Галилея* — см. разд. 3.2). Ученые считали, что свет распространяется с одинаковой скоростью во всех направлениях только в этой среде — в эфире.

Еще в 1675 г. датский астроном Оле Кристенсен Ромер (Romer, 1644—1710 гг.) по наблюдениям затмений спутников Юпитера определил скорость распространения света.

Экспериментальное доказательство волновой теории света было получено в 1849—1851 гг., когда французские физики Фуко и Арман Ипполит Луи Физо (Armand Hippolyte Louis Fizeau, 1819—1896 гг.) независимо друг от друга измерили скорость распространения света в воде.

Идея опытов Физо состояла в измерении скорости света в движущейся среде. Опыты были поставлены для проверки вопроса об увлечении или неувлече-

<sup>1</sup> **Эфир** (греч. aithér) **мировой** или **световой** — гипотетическая всепроникающая среда, которой наука прошлых столетий приписывала роль переносчика света и вообще электромагнитных взаимодействий. Современная наука считает, что электромагнитное поле является самостоятельным объектом, не нуждающемся в специальном носителе.

нии эфира. В двух трубках равной длины вода двигалась в противоположных направлениях со значительными постоянными скоростями. Используя быстро вращающийся модулятор (шестерню с зубцами) на пути распространения луча света, Физо установил, что скорость света в воде равна  $0,75c$  (т. е. меньше, чем в воздухе).

Опыт, проведенный в 1881 г. американским физиком Альбертом Абрахамом Майкельсоном (Albert Abraham Michelson, 1852—1931 гг.) в Берлине у немецкого физика Германа Людвига Фердинанда Гельмгольца (Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz, 1821—1894 гг.), доказал независимость скорости света от движения Земли. В 1887 и 1905 гг. Майкельсон и Э. У. Морли более тщательно повторили опыты 1881 г.

В разное время разные ученые по-разному определяли скорость света: Фуко в 1862 г. —  $(298\,000 \pm 500) \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ , Перотен —  $(299\,860 \pm 80) \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ , Майкельсон в 1926 г. —  $(299\,796 \pm 4) \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ , К. Фрум (K. Froome) в 1958 г. —  $(299\,792,5 \pm 0,1) \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ , К. Ивенсон (K. Evenson) в 1972 г. —  $(299\,792\,456,2 \pm \pm 0,8) \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ . Решением Генеральной ассамблеи Международного комитета по численным данным для науки и техники (КОДАТА), в 1973 г. проанализировавшей все имеющиеся данные на их достоверность и погрешность, скорость света в вакууме принято считать равной:  $c_0 = (299\,792\,458 \pm 1,2) \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Опыты Майкельсона и других физиков опровергли теорию "неподвижного эфира" и дали основание для формулировки противоположного утверждения, которое и получило название "принципа относительности". Так это название вводится и обосновывается в первых работах французского физика Жюль Анри Пуанкаре (Jules Henri Poincaré, 1854—1912 гг.) и Эйнштейна.

В 1905 г. в своей знаменитой статье "К электродинамике движущихся сред" Эйнштейн писал: "... неудавшиеся попытки обнаружить движение Земли относительно "светоносной среды" ведут к предположению, что не только в механике, но и в электродинамике никакие свойства явлений не соответствуют понятию абсолютного покоя, и даже более того, — к предположению, что для всех координатных систем, для которых справедливы уравнения механики, имеют место те же самые электродинамические и оптические законы, как это уже доказано для величин первого порядка. Мы намерены это положение (содержание которого в дальнейшем будет называться "принципом относительности") превратить в предпосылку... Мы намерены сделать, кроме того, добавочное допущение, находящееся с первым лишь в кажущемся противоречии, а именно, что свет в пустоте всегда распространяется с определенной скоростью  $c$ , не зависящей от состояния движения излучающего тела... Дальнейшие соображения опираются на принцип относительности и на принцип постоянства скорости света. Мы формулируем оба принципа следующим образом: 1. Законы, по которым из-

меняются состояния физических систем, не зависят от того, к которой из двух координатных систем, движущихся относительно друг друга равномерно и прямолинейно, эти изменения состояния относятся; 2. Каждый луч света движется в "покоящейся" системе координат с определенной скоростью  $c$ , независимо от того, испускается ли этот луч света покоящимся

или движущимся телом. При этом  $c = \frac{\text{путь}}{\Delta t}$ ."

А вот что писал Пуанкаре: "Эта невозможность показать опытным путем абсолютное движение Земли представляет закон природы; мы приходим к тому, чтобы принять этот закон, который мы назовем **постулатом относительности**, и примем его без оговорок".

Но российский физик Леонид Исаакович Мандельштам (1879—1944 гг.) в своих лекциях по теории относительности разъяснял: "Название "принцип относительности" — одно из самых неудачных. Утверждается независимость явлений от неускоренного движения замкнутой системы. Это вводит в заблуждение многие умы". На неудачность названия указывал и один из творцов теории относительности, раскрывший ее содержание в четырехмерной геометрической форме, — немецкий математик и физик Герман Минковский (H. Minkowski, 1864—1909 гг.). В 1908 г. он утверждал: "... термин "постулат относительности" ... кажется мне слишком бедным. Так как смысл постулата сводится к тому, что в явлениях нам дается только четырехмерный в пространстве и времени мир, но что проекции этого мира на пространство и на время могут быть взяты с некоторым произволом, мне хотелось бы этому утверждению дать название: **постулат абсолютного мира**".

В отличие от классической механики, в специальной теории относительности (СТО) одновременность двух событий, происходящих в разных точках пространства, относительна: события, одновременные в одной *инерциальной системе отсчета*, не одновременны в других инерциальных системах (т. е. системах отсчета, в которых справедлив закон инерции (первый закон Ньютона) — см. разд. 3.1), движущихся относительно первой.

В основе СТО лежат **постулаты Эйнштейна**:

- ❑ **принцип относительности**: никакие опыты (механические, электрические, оптические), проведенные в данной инерциальной системе отсчета, не дают возможности обнаружить, покоится ли эта система или движется равномерно и прямолинейно; все законы природы инвариантны по отношению к переходу от одной инерциальной системы к другой;
- ❑ **принцип инвариантности скорости света**: скорость света в вакууме не зависит от скорости движения источника и приемника света или наблюдателя, и одинакова во всех инерциальных системах отсчета.

Первый постулат, являясь обобщением *механического принципа относительности Галилея* (см. разд. 3.2) на любые физические процессы, утверждает таким образом, что физические законы инвариантны по отношению к выбору инерциальной системы отсчета, а уравнения, описывающие эти законы, одинаковы по форме во всех инерциальных системах отсчета. Согласно этому постулату, все инерциальные системы отсчета совершенно равноправны, т. е. явления механические, электродинамические, оптические и др. во всех инерциальных системах отсчета протекают одинаково.

Согласно второму постулату, постоянство скорости света в вакууме — фундаментальное свойство природы.

Значение этих постулатов для дальнейшего развития теории пространства-времени состояло в том, что их принятие, прежде всего, означало отказ от старых представлений о пространстве и времени, как о многообразиях, не связанных органически друг с другом.

На рис. 119 представлена схема эксперимента, который иллюстрирует неодновременность событий в разных системах. Система отсчета  $K$  связана с Землей, система  $K'$  — с вагоном, движущимся относительно Земли прямолинейно и равномерно со скоростью  $v$ . На Земле и в вагоне отмечены точки  $A$ ,  $M$ ,  $B$  и соответственно  $A'$ ,  $M'$  и  $B'$ , причем  $AM = MB$  и  $A'M' = M'B'$ . В момент, когда указанные точки совпадают, в точках  $A$  и  $B$  происходят события — ударяют две молнии. В системе  $K$  сигналы от обеих вспышек придут в точку  $M$  одновременно, т. к.  $AM = MB$ , и скорость света одинакова во всех направлениях. В системе  $K'$ , связанной с вагоном, сигнал из точки  $B'$  придет в точку  $M'$  раньше, чем из точки  $A'$ , ибо скорость света одинакова во всех направлениях, но  $M'$  движется навстречу сигналу, пущенному из точки  $B'$ , и удаляется от сигнала, пущенного из точки  $A'$ . Значит, события в точках  $A'$  и  $B'$  не одновременны: событие в точке  $B'$  произошло раньше, чем в точке  $A'$ . Если бы вагон двигался в обратном направлении, то получился бы и обратный результат.

Таким образом, Эйнштейну удалось показать, что сравнение показаний часов, если принимать во внимание их относительное движение, не требует особого внимания лишь в том случае, когда относительные скорости часов значительно меньше, чем скорость распространения света в вакууме.



---

Первым результатом анализа Эйнштейна явилось установление **относительности одновременности**: два события, происходящие на достаточном удалении друг от друга, могут оказаться для одного наблюдателя одновременными, а для наблюдателя, движущегося относительно него, происходящими в разные моменты времени.

---

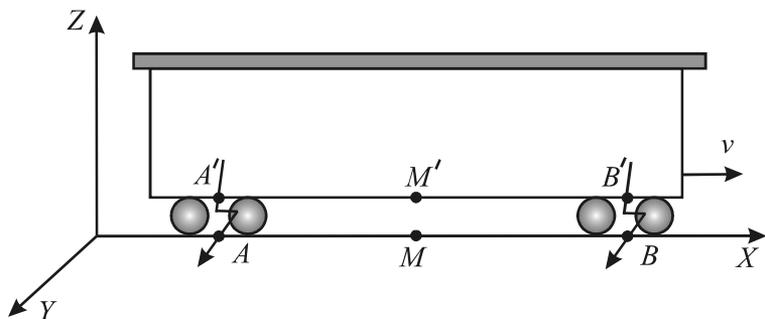


Рис. 119. Неодновременность событий в разных инерциальных системах отсчета

Поэтому предположение о едином времени не может быть оправданно: невозможно указать определенную процедуру, позволяющую любому наблюдателю установить такое универсальное время независимо от того движения, в котором он участвует. В системе отсчета должны присутствовать еще и часы, движущиеся вместе с наблюдателем и синхронизированные с часами наблюдателя.



Понятие одновременности пространственно разделенных событий относительно. Из постулатов теории относительности и существования конечной скорости распространения сигналов следует, что в разных инерциальных системах отсчета время течет по-разному.

Следующий шаг, сделанный Эйнштейном, состоял в установлении новых взаимоотношений результатов измерений расстояний и времени в двух различных инерциальных системах отсчета. СТО вместо "абсолютных длин" и "абсолютного времени" явила на свет иную "абсолютную величину", которую принято называть **инвариантным пространственно-временным интервалом**. Для двух заданных событий, происходящих на некотором удалении друг от друга, пространственное расстояние между ними не является абсолютным (т. е. не зависящим от системы отсчета) величиной даже в ньютоновской схеме, если между наступлением этих событий есть некоторый интервал времени. Действительно, если два события происходят не одновременно, наблюдатель, движущийся с некоторой системой отсчета в одном направлении и оказавшийся в той точке, где наступило первое событие, может за промежуток времени, разделяющий два эти события, оказаться в том месте, где наступает второе событие; для этого наблюдателя оба события будут происходить в одном и том же месте пространства, хотя для наблюдателя, движущегося в противоположном направлении, они могут показаться происшедшими на значительном удалении друг от друга.

Характеризуя сущность СТО, Л. И. Мандельштам писал: *"Теория относительности — физическая теория. Эта теория была создана для охвата большого класса физических явлений, которые — надо сказать определенно — долго и упорно не укладывались в рамки существовавших воззрений. Основным здесь были электромагнитные явления в движущихся телах. ...Принцип относительности позволил преодолеть эти трудности и непротиворечиво объяснить явления в движущихся телах"*<sup>1</sup>.

СТО часто называется **релятивистской теорией**, а специфические явления, описываемые этой теорией (например, эффект замедления времени), — **релятивистскими эффектами**.



СТО, принципы которой сформулировал в 1905 г. Эйнштейн, представляет собой современную физическую теорию пространства и времени, в которой, как и в классической ньютоновской механике, предполагается, что время однородно, а пространство однородно и изотропно.

---

Общая теория относительности, называемая иногда теорией тяготения, — результат развития СТО. Из нее вытекает, что свойства пространства-времени в данной области определяются действующими в ней полями тяготения. При переходе к космическим масштабам геометрия пространства-времени может изменяться от одной области к другой в зависимости от концентрации масс в этих областях и их движения.

В 2005 г. теория относительности Альберта Эйнштейна среди 10 наиболее значимых научных теорий за всю историю человечества была поставлена на седьмое место<sup>2</sup>.

### Контрольные вопросы

- ? Объясните сущность теории относительности.
- ? Какие основные постулаты лежат в основе специальной теории относительности?

<sup>1</sup> Мандельштам Л. И. Полное собрание трудов. Том V. — М.: Изд-во АН СССР, 1950.

<sup>2</sup> Опрос ученых проводился журналом New Scientist.

## 10.2. Движение тел с околосветовой скоростью. Преобразования Лоренца

Благодаря чему? Ах, Эйнштейн... Да-да, помню. Я проходил это в школе во втором классе.

А. и Б. Стругацкие<sup>1</sup>, "Понедельник начинается в субботу"

**Релятивистская<sup>2</sup> механика** — раздел теоретической физики, рассматривающий законы движения тел (частиц) при скоростях, сравнимых со скоростью света.

Релятивистская механика основана на *специальной теории относительности*. Основные уравнения релятивистской механики — релятивистское обобщение *второго закона Ньютона* (см. разд. 3.6) и релятивистский закон сохранения энергии-импульса — удовлетворяют требованиям принципа относительности Эйнштейна. Из них, в частности, следует, что скорость материальных объектов не может превышать скорость света в вакууме. При малых скоростях релятивистская механика переходит в классическую механику Ньютона.

По формулам **преобразований Лоренца<sup>3</sup>** осуществляется преобразование координат и времени любого события при переходе от одной инерциальной системы координат к другой.

В простейшем случае, когда система  $K'$  движется относительно системы  $K$  со скоростью  $v$  так, как показано на рис. 119, преобразования Лоренца для координат и времени при переходе от  $K$ -системы к  $K'$ -системе имеют вид:

$$\begin{aligned}x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \gamma(x - vt); \\y' &= y; \quad z' = z; \quad \beta = \frac{v}{c_0}; \\t' &= \frac{t - xv/c_0^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \gamma(t - xv/c_0^2); \\ \gamma^{-1} &= \sqrt{1 - \beta^2} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c_0^2}}.\end{aligned}\tag{298}$$

<sup>1</sup> Аркадий Натанович (1925—1991 гг.) и Борис Натанович (1933 г.) Стругацкие — российские писатели.

<sup>2</sup> От лат. *relativus* — относительный.

<sup>3</sup> Получены в 1904 г. голландским физиком Хендриком Антоном Лоренцем (Hendrik Antoon Lorentz, 1853—1928 гг.).

При обратном переходе от  $K'$  к  $K$ -системе:

$$\begin{aligned} x &= \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \gamma(x' + vt'); \\ y &= y'; \quad z = z'; \\ t &= \frac{t' + x'v/c_0^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \gamma(t' + x'v/c_0^2), \end{aligned} \tag{299}$$

где  $\beta = v/c_0$ ;  $v$  — скорость  $K'$ -системы относительно  $K$ -системы;  $c_0$  — скорость света в вакууме.




---

Преобразования Лоренца линейны относительно  $x$  и  $t$ .

---

При скоростях, малых по сравнению со скоростью света, для вычисления  $\gamma$  удобно использовать формулу:

$$\gamma \approx 1 + \frac{1}{2}\beta^2 = 1 + \frac{1}{2}\left(\frac{v}{c_0}\right)^2 \text{ при } v \ll c_0. \tag{300}$$

При скоростях, близких к скорости света, для вычисления  $\gamma$  используют следующую формулу:

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \approx \frac{1}{\sqrt{2\Delta}} \\ \Delta &= 1 - \beta, \quad \Delta \ll 1. \end{aligned} \tag{301}$$

*Постулаты Эйнштейна* помогли прийти к новому фундаментальному положению в физической теории пространства и времени — положению о тесной взаимосвязи пространства и времени и об их нераздельности. В этом заключается главное значение постулатов Эйнштейна.

Основное содержание теории относительности составляет постулат о постоянстве скорости света. Основным аргументом в пользу этого является та роль, которую отводил Эйнштейн световым сигналам, с помощью которых устанавливается одновременность пространственно разобщенных событий. Световой сигнал, распространяющийся всегда только со скоростью света, приравнивается, таким образом, к некоторому инструменту, определяющему связь между временными отношениями в различных системах отсчета, без которого якобы понятия одновременности разобщенных событий и времени теряют смысл.

Формулы преобразований Лоренца переходят в формулы классической кинематики при  $v/c_0 \ll 1$ :

$$\begin{aligned}x' &= x - vt, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = t; \\x &= x' + vt, \quad y = y', \quad z = z', \quad t = t'.\end{aligned}\tag{302}$$

Переход формул теории относительности в формулы кинематики при условии  $v/c_0 \ll 1$  является проверкой справедливости этих формул.




---

Скорость света  $c_0$  инвариантна по отношению к преобразованиям Лоренца.

При  $v \ll c_0$  преобразования Лоренца переходят в преобразования Галилея. Преобразования Галилея являются частным случаем преобразований Лоренца.

---

### 10.3. Понятие одновременности

Зная интервал времени между событиями  $t_2 - t_1$  в  $K$ -системе отсчета, можно рассчитать интервал времени  $t'_2 - t'_1$  между этими событиями, регистрируемыми в  $K'$ -системе, движущейся с постоянной скоростью  $v$  относительно  $K$ -системы:

$$(t'_2 - t'_1) = \frac{(t_2 - t_1) - (x_2 - x_1)v/c_0^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}.\tag{303}$$

Таким образом, одновременность ( $t_1 = t_2$ ) пространственно разделенных событий перестает быть чем-то абсолютным, как это принято считать в повседневном макроскопическом эксперименте, а начинает зависеть от выбора инерциальной системы отсчета  $K'$ , в которой измеряется время свершения событий, и зависит от расстояния между точками системы  $K$ , в которых произошло одновременное событие. Эта *относительность одновременности* пространственно разделенных событий свидетельствует о том, что пространство и время тесно связаны друг с другом, т. к. при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой, физически эквивалентной, промежуток времени ( $t'_2 - t'_1$ ) между событиями становится зависящим от расстояния  $(x_2 - x_1)$ .



События, одновременные в одной инерциальной системе отсчета, не одновременны в другой инерциальной системе.

---

### Контрольные вопросы

- ? Что вы можете сказать об одновременности пространственно разделенных событий?
- ? В чем заключается относительность одновременности событий?

## 10.4. Релятивистское сокращение продольных размеров тела

Еще в конце XVIII в. ирландский физик Джордж Фицджеральд (George FitzGerald, 1851—1901 гг.), совершенствуя теорию Максвелла, пришел к странному выводу: эталон метра, двигаясь с большой скоростью, должен укорачиваться. Сначала этот вывод считался неверным, а позднее он стал одним из краеугольных камней теории относительности. Из преобразований Лоренца следует:

$$L = L_0 \sqrt{1 - \beta^2} = L_0 / \gamma, \quad (304)$$

где  $L$  — длина тела в  $K$ -системе, относительно которой тело движется вдоль оси  $x$  с постоянной скоростью  $v$ ;  $L_0$  — длина тела в  $K'$ -системе, движущейся вместе с телом со скоростью  $v$  относительно  $K$ -системы (собственная длина тела).



Продольные размеры предметов, движущихся относительно инерциальной системы отсчета  $K$  с постоянной скоростью, близкой к скорости света  $c_0$ , сокращаются.

---

### Контрольные вопросы

- ? В чем заключается относительность длин (расстояний)? Какая формула выражает смысл этого понятия?
- ? В чем заключается релятивистский эффект сокращения длины тел?

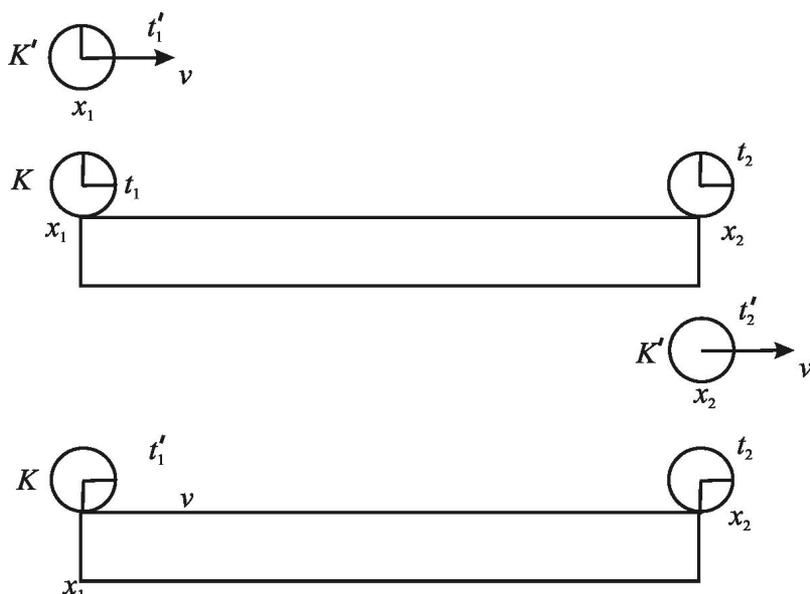
## 10.5. Релятивистское замедление времени

Не помню, как поднял я свой звездолет.  
 Лечу в настроении питейном:  
 Земля ведь ушла лет на триста вперед  
 По гнусной теории Эйнштейна!

*В. С. Высоцкий, Песня про Тяу Кита (июнь 1966 г.)*

Теория СТО утверждает, что в инерциальных системах, движущихся со скоростью  $v$ , близкой к скорости света  $c_0$ , происходит замедление часов.

Замедление движущихся часов может быть обнаружено в следующем опыте (рис. 120).



**Рис. 120.** Замедление движущихся часов

Движущиеся со скоростью  $v$  часы, измеряющие время  $t'$ , проходят последовательно мимо точки  $x_1$  в момент  $t_1$  и мимо точки  $x_2$  в момент  $t_2$ . В эти моменты производится сравнение положений стрелок движущихся часов и соответствующих неподвижных часов, находящихся в системе  $K'$ .

Пусть за время движения от точки  $x_1$  до точки  $x_2$  стрелки движущихся часов отмеряют промежуток времени  $\tau'$ , а стрелки часов, предварительно синхронизированных в неподвижной системе  $K$ , отмеряют промежуток времени  $\tau$ .

Таким образом:

$$\begin{aligned} \tau' &= t'_2 - t'_1, \\ \tau &= t_2 - t_1. \end{aligned} \tag{305}$$

Но согласно обратным преобразованиям Лоренца имеем:

$$t_2 - t_1 = \frac{(t'_2 - t'_1) + \frac{v}{c_0^2}(x'_2 - x'_1)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c_0^2}}}. \tag{306}$$

Подставляя (305) в (306) и замечая, что движущиеся часы все время находятся в одной и той же точке движущейся системы отсчета, т. е. что  $x'_1 = x'_2$ , получаем:

$$\tau = \frac{\tau'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c_0^2}}}, \tag{307}$$

или:

$$T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} = T_0 \gamma, \tag{308}$$

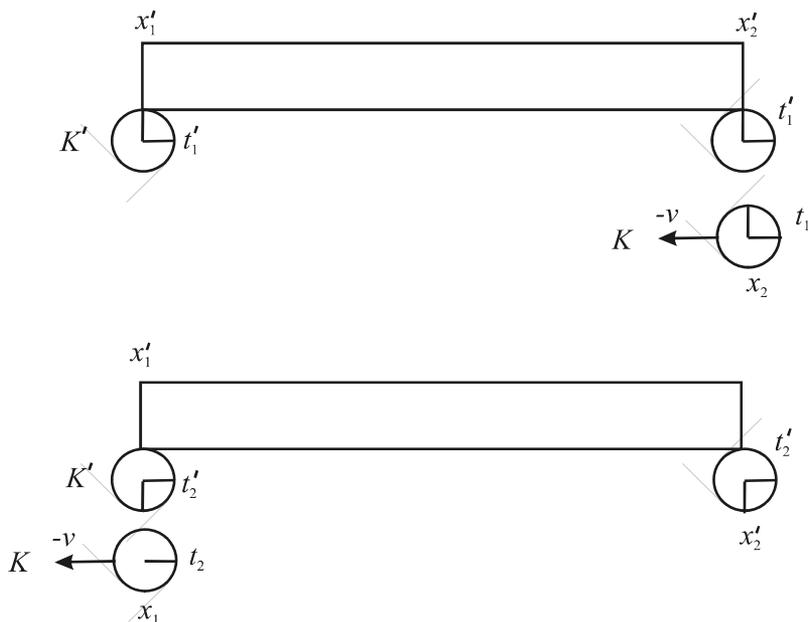
где  $T_0$  — длительность (собственное время<sup>1</sup>) события, происходящего в  $K'$ -системе, движущейся со скоростью  $v$  относительно  $K$ -системы;  $T$  — длительность этого же события, измеренная в  $K$ -системе отсчета.

Формула (307) означает, что промежуток времени, измеряемый "неподвижными" часами, оказывается большим, чем промежуток времени, измеренный движущимися часами. Это означает, что движущиеся часы отстают от неподвижных, т. е. их ход замедляется. Эта формула также обратима, как и соответствующая формула для масштабов. Однако, написав обратную формулу в виде:

$$\tau_0 = \frac{\tau}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c_0^2}}}, \tag{309}$$

мы должны подразумевать, что  $\tau_0 = t'_2 - t'_1$ ,  $\tau = t_2 - t_1$  измеряются уже не в предыдущем опыте, а в следующем (рис. 121).

<sup>1</sup> **Собственное время** — время, прошедшее в той системе отсчета, в которой объект покоится.



**Рис. 121.** Замедление движущихся часов

В этом случае согласно преобразованиям Лоренца:

$$t_2' - t_1' = \frac{(t_2 - t_1) + \frac{v}{c_0^2}(x_2 - x_1)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c_0^2}}}. \quad (310)$$

При условии  $x_2 = x_1$  получаем формулу (309). Полученное замедление является вполне реальным, однако оно имеет, так сказать, чисто кинематическую природу. Например, в схеме предыдущего опыта тот результат, что часы 2 оказались впереди движущихся часов, с точки зрения движущейся системы объясняется тем, что часы 2 с самого начала шли несинхронно с часами 1 и опережали их (в силу неодновременности разобобщенных событий, одновременных в другой, движущейся системе отсчета).



Замедление движущихся часов и сокращение продольных размеров движущихся с околосветовыми скоростями тел являются следствиями из теории СТО.

Более поразительным и вызывающим большое число споров и недоразумений является так называемый "**парадокс часов**". Пусть часы  $A$  находятся в точке 1 в неподвижной инерциальной системе отсчета  $K$ , а в точности такие же часы  $B$ , находившиеся в начальный момент также в точке 1, движутся к точке 2 со скоростью  $v$ . Затем, пройдя путь  $L$  до точки 2, часы  $B$  возвращаются и, приобретая противоположную скорость  $-v$ , возвращаются в точку 1 (рис. 122).

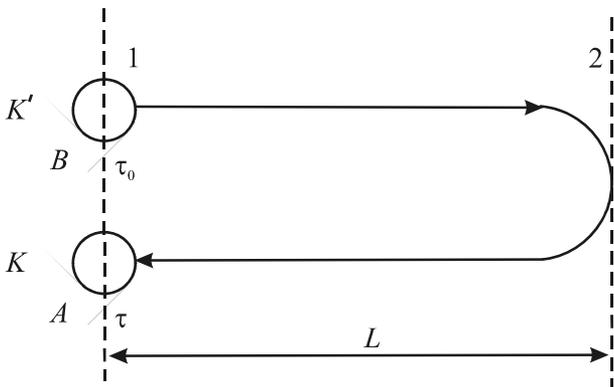


Рис. 122. Парадокс часов

Если время, требуемое на изменение скорости  $v$  движущихся часов  $B$  на обратную ( $-v$ ), достаточно мало по сравнению со временем  $t = \frac{L}{v}$  прямолинейного и равномерного движения от точки 1 до точки 2, то время, за которое часы  $B$  проходят весь путь 1-2-1, отмеренное часами  $A$ , и время, отмеренное часами  $B$ , можно вычислить согласно (307) по формулам:

$$t = \frac{2L}{v}, \quad t_0 = t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c_0^2}} + \delta, \quad (311)$$

где  $\delta$  — возможная малая поправка на время ускоренного движения часов  $B$ .

Следовательно, часы  $B$ , вернувшись в точку 1, реально отстанут от часов  $A$  на время:

$$t - t_0 = 2 \frac{L}{v} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{v^2}{c_0^2}} \right) - \delta. \quad (312)$$

Особенность этого кинетического следствия преобразований Лоренца состоит в том, что здесь отставание хода движущихся часов является вполне реальным эффектом, а не результатом избранной процедуры измерения. Реаль-

но должны замедляться все процессы, происходящие в системе  $K'$ , по сравнению с процессами, идущими в системе  $K$ . В том числе должны отставать и биологические процессы организмов, находящихся вместе с часами  $B$ . То есть должны замедляться и физиологические процессы в организме человека и животных, путешествующих в системе  $K'$ , в результате чего организм, находившийся в системе в момент ее возврата в точку 1, окажется менее постаревшим, чем организм, оставшийся в системе.

Парадоксальным представляется здесь то, что одни из часов реально отстают от других. Ведь это кажется противоречащим самому принципу относительности, т. к. согласно последнему любую из систем  $K$  и  $K'$  можно считать неподвижной. Но тогда представляется, что лишь в зависимости от нашего выбора реально отстающими могут стать любые из часов  $A$  и  $B$ . Но последнее явно абсурдно, т. к. реально отстают часы  $B$  от часов  $A$ .

Ошибочность последнего рассуждения состоит в том, что системы  $K$  и  $K'$  физически не равноправны, т. к. система  $K$  все время инерциальна, система же  $K'$  некоторый промежуток времени, когда производится изменение ее скорости на обратную, неинерциальна. Следовательно, вторая из формул (311) для системы  $K'$  неприменима, т. к. во время ускорения ход удаленных часов может сильно измениться за счет инерциального гравитационного поля.

Однако и это совершенно правильное объяснение представляется весьма поразительным. Ведь в течение большого промежутка времени обе системы движутся друг относительно друга прямолинейно и равномерно. Поэтому, с точки зрения системы  $K'$ , часы  $A$ , находящиеся в  $K$ , отстают (но не уходят вперед) в полном соответствии с формулой (311). И лишь за малый промежуток времени, когда в системе  $K'$  действуют силы инерции, часы  $A$  быстро уходят вперед на промежуток времени, вдвое больший, чем  $\Delta t$ . При этом, чем большее ускорение испытывает система  $K'$ , тем быстрее бежит время на часах  $A$ .




---

По измерениям наблюдателя, находящегося в инерциальной системе  $K$ , в движущейся со скоростью  $v$  инерциальной системе  $K'$  течение времени замедляется.

---

### Контрольные вопросы

- ? В чем заключается суть относительности промежутков времени? Какая формула выражает смысл этого понятия?
- ? В чем заключается релятивистский эффект замедления времени?

## 10.6. Релятивистский закон преобразования скорости

Преобразования скоростей тел, движущихся в различных инерциальных системах  $K$  и  $K'$ , определяются по формулам **релятивистского закона преобразования скорости**:

$$u' = \frac{u - v}{1 - \frac{v}{c_0^2} u}, \quad (313)$$

$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{v}{c_0^2} u'}, \quad (314)$$

где  $u$ ,  $u'$  — скорости движения тела относительно  $K$  и  $K'$ -систем отсчета соответственно;  $v$  — скорость движения  $K'$ -системы относительно  $K$ -системы отсчета.

### Контрольные вопросы

- ? Напишите релятивистский закон сложения скоростей.
- ? Сравните классический и релятивистский законы сложения скоростей.

## 10.7. Парадокс близнецов

Представим себе еще один мысленный эксперимент — с участием двух близнецов. Они сверяют часы. Один из близнецов на космическом корабле совершает длительное путешествие в космос со скоростью близкой к скорости света. Когда он возвращается, близнецы снова сравнивают показания часов. Согласно специальной теории относительности Эйнштейна часы путешественника покажут несколько меньшее время, следовательно, он будет выглядеть моложе, — "**парадокс близнецов**".

Данный парадокс СТО опровергается с помощью общей теории. С одной точки зрения можно было бы сказать, что силы инерции, созданные ускорением, вызывают замедление часов космонавта; с другой точки зрения возникновение ускорения просто обнаруживает изменение системы отсчета. Вследствие такого изменения мировая линия<sup>1</sup> космического корабля, т. е. его

<sup>1</sup> **Мировая линия** — кривая в пространстве-времени, изображающая движение классической точечной частицы.

путь на диаграмме в четырехмерном пространстве-времени Минковского<sup>1</sup> изменяется так, что полное собственное время путешествия с возвратом окажется меньше, чем полное собственное время вдоль мировой линии близнеца на Земле. Парадоксальная разница в возрасте объясняется независимо от того, какой из близнецов считается покоящимся.

Поскольку замедление часов путешествующего близнеца можно рассматривать как гравитационное явление, любой опыт, который показывает замедление времени под действием гравитации, представляет собой косвенное подтверждение парадокса близнецов. В последние годы было получено множество таких подтверждений.

Этот эффект был проверен в 1925 г. для "белого карлика"<sup>2</sup> — спутника Сириуса. Так как около "белого карлика" время течет медленнее, изменяется частота испускаемого им излучения.

В 1958 г. был обнаружен эффект Мёссбауэра<sup>3</sup>, который позволил проверить этот результат на Земле. Ученые смогли сравнить ход атомных часов на поверхности Земли с ходом часов, поднятых на высоту, разность их хода хорошо согласовывалась с расчетами по теории Эйнштейна.

## 10.8. Релятивистский интервал

**Релятивистским интервалом**  $\Delta S$  между событиями называется величина, квадрат которой определяется как

$$\Delta S^2 = c_0^2 \Delta t^2 - \Delta l^2 = \text{inv}, \quad (315)$$

где  $\Delta t$  — промежуток времени между событиями;  $\Delta l$  — расстояние между двумя точками, в которых происходят данные события:

$$\Delta l^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2. \quad (316)$$

Интервал — величина инвариантная, т. е. не зависящая от системы отсчета. Инвариантность интервала следует из преобразований Лоренца.

<sup>1</sup> **Минковского пространство-время** — четырехмерное пространство, точки которого сопоставляются с событиями СТО. Введено в физику Г. Минковским в 1908 г.

<sup>2</sup> **"Белый карлик"** — звезда гигантской плотности, обладающая мощным гравитационным полем.

<sup>3</sup> **Эффект Мёссбауэра (ядерный гамма-резонанс, ЯГР)** — испускание и поглощение  $\gamma$ -квантов атомными ядрами в твердом теле, обусловленное ядерными переходами, не сопровождающимися изменением колебательной энергии тела.

## 10.9. Релятивистская масса.

### Релятивистский импульс. Кинетическая энергия релятивистской частицы

В течение многих лет при решении задач механики использование законов Ньютона приводило к правильным результатам. Однако в начале XX в. при изучении движения очень быстрых электронов в электрических и магнитных полях оказалось, что результаты экспериментов не совпадают с расчетами, выполненными с применением *второго закона Ньютона* в его классической форме. Стало ясно, что классическая механика не универсальна и не пригодна для решения любых задач.

В соответствии с релятивистской механикой масса движущегося тела  $m$  зависит от скорости его движения  $v$  :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c_0^2}}} = m_0 \gamma, \quad (317)$$

где  $m$  — **релятивистская масса**;  $m_0$  — масса покоя тела.




---

Релятивистская масса больше массы покоя  $m_0$  и зависит от скорости  $v$  .

Масса одной и той же частицы различна в разных инерциальных системах, движущихся относительно одной из них с различными скоростями.

Масса покоя  $m_0$  является характеристической величиной частицы.

---

Зависимость свойств пространства и времени от движения системы отсчета приводит к тому, что сохраняющейся при любых взаимодействиях тел является величина:

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c_0^2}}}, \quad (318)$$

называемая **релятивистским импульсом**.

При  $v/c_0 \ll 1$  выражение для импульса переходит в то, которое используется в механике Ньютона  $p = mv$  , где под  $m$  понимается масса покоя "классиче-

ской" частицы ( $m = m_0$ ), ибо при  $v/c_0 \ll 1$  различие между  $m$  и  $m_0$  несущественно. Однако при скоростях, близких к скорости света (релятивистские скорости), только выражение (318) дает правильные результаты, согласующиеся с экспериментом.



Классический закон сложения скоростей и классический закон сохранения импульса являются частными случаями универсальных релятивистских законов и выполняются только при значениях скоростей, значительно меньших скорости света в вакууме.

Возрастание массы тела с увеличением скорости приводит к тому, что ни одно тело с массой покоя, не равной нулю, не может достигнуть скорости, равной скорости света в вакууме. Скорость  $v$ , бóльшая  $c_0$ , теоретически приводит для обычных частиц к мнимой массе и мнимому импульсу, что физически бессмысленно. Зависимость массы от скорости начинает сказываться лишь при скоростях, близких к  $c_0$  (рис. 123).

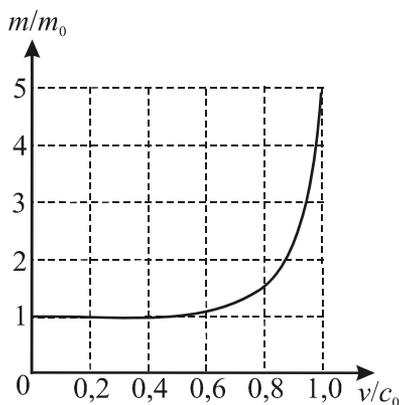


Рис. 123. Зависимость массы от скорости

Приведенные здесь формулы неприменимы к фотону, т. к. у него отсутствует масса покоя ( $m_0 = 0$ ). Фотон всегда движется со скоростью, равной скорости света в вакууме, и является ультрарелятивистской частицей. Тем не менее, отсюда не следует постоянство скорости света во всех веществах.

Уравнение

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = \mathbf{F} \quad (319)$$

удовлетворяет требованиям теории относительности, если импульс релятивистской частицы описывается формулой (318). Следовательно, **основное уравнение релятивистской динамики** имеет вид:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c_0^2}}} \right) = F. \quad (320)$$



Основное уравнение релятивистской динамики инвариантно по отношению к преобразованиям Лоренца.

Сила  $F$  в релятивистской динамике не инвариантна: в разных инерциальных системах отсчета ее численное значение и направление различны.

-----

**Кинетическую энергию релятивистской частицы** можно определить следующим образом:

$$E_K = E - E_0,$$

$$E_K = c_0^2 \left( \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} - m_0 \right) = c_0^2 (m - m_0) = c_0^2 \Delta m, \quad (321)$$

где  $\beta = v/c_0$ ;  $E$  — полная энергия;  $E_0$  — энергия покоя.

В данном случае мы рассматриваем только кинетическую энергию, т. е. не учитываем возможность релятивистской частицы взаимодействовать с внешними полями.



Приращение кинетической энергии релятивистской частицы пропорционально приращению релятивистской массы частицы.

Кинетическая энергия релятивистской частицы равна разности ее полной энергии и ее энергии покоя.

При малых скоростях частиц выражение для кинетической энергии частицы принимает вид выражения, принятого в классической механике.

-----

### Контрольные вопросы

- ? Напишите формулу, выражающую зависимость массы тела от скорости его движения. В каком случае масса не зависит от скорости движения тела?
- ? Как записывается выражение для релятивистского импульса?
- ? Как записывается второй закон Ньютона в релятивистском виде?
- ? Напишите формулу, выражающую связь массы и энергии при нерелятивистском движении, и объясните ее смысл.
- ? Что называют энергией покоя? Какая формула выражает смысл этого понятия?

## 10.10. Взаимосвязь энергии и массы

Полная энергия  $E$  тела (или частицы) пропорциональна релятивистской массе  $m$  (**закон взаимосвязи массы и энергии**):

$$E = mc_0^2, \quad (322)$$

где  $E$  — полная энергия тела;  $m$  — релятивистская масса тела;  $c_0$  — скорость света в вакууме.

Так как релятивистская масса зависит от скорости  $v$ , с которой тело (частица) движется в данной системе отсчета, то полная энергия различна в разных инерциальных системах отсчета<sup>1</sup>.

Наименьшей энергией  $E_0$  тело (частица) обладает в системе отсчета, относительно которой оно покоится ( $v = 0$ ). Энергия  $E_0$  называется **собственной энергией** или **энергией покоя** тела (частицы):

$$\begin{aligned} E_0 &= m_0 c_0^2, \\ m_0 &= \frac{E_0}{c_0^2}, \end{aligned} \quad (323)$$

где  $E_0$  — энергия покоя (собственная энергия) тела;  $m_0$  — масса покоя тела.




---

Масса релятивистской частицы приобретает смысл энергосодержания частицы.

---

Энергия покоя тела является его внутренней энергией. Она состоит из суммы энергий покоя всех частиц тела  $\sum_i m_{0i} c_0^2$ , кинетической энергии всех частиц

<sup>1</sup> Тело (или частица) не находится в силовом поле.

относительно общего центра масс и потенциальной энергии их взаимодействия. Поэтому:

$$m_0 c_0^2 \neq \sum_i m_{0i} c_0^2 \text{ и } m_0 \neq \sum_i m_{0i}, \quad (324)$$

где  $m_{0i}$  — масса покоя  $i$ -й частицы.




---

В релятивистской механике не выполняется закон сохранения массы покоя.

---

Например, масса покоя  $m_0$  атомного ядра меньше, чем сумма собственных масс частиц, входящих в ядро. Наоборот, масса  $m_0$  покоя частицы, способной к самопроизвольному распаду, больше суммы собственных масс продуктов распада  $m_{01}$  и  $m_{02}$ :

$$m_0 > m_{01} + m_{02}. \quad (325)$$

Несохранение массы покоя не означает нарушения закона сохранения массы вообще. В теории относительности справедлив **закон сохранения релятивистской массы**. Он вытекает из формулы закона взаимосвязи массы и энергии (322). В изолированной системе тел сохраняется полная энергия. Следовательно, сохраняется и релятивистская масса.

В теории относительности законы сохранения энергии и релятивистской массы взаимосвязаны и представляют собой единый **закон сохранения массы и энергии**.

Из этого закона не следует возможность преобразования массы в энергию и обратно. Масса и энергия представляют собой два качественно различных свойства материи, не "эквивалентных" друг другу. Ни один из известных опытных фактов не дает оснований для вывода о "переходе массы в энергию". Превращение энергии системы из одной формы в другую сопровождается превращением массы. Например, в явлении рождения и уничтожения пары электрон-позитрон, в полном соответствии с законом сохранения релятивистской массы и энергии, масса не переходит в энергию. Масса покоя частиц (электрона и позитрона) преобразуется в массу фотонов, т. е. в массу электромагнитного поля.

Гипотеза Эйнштейна о существовании собственной энергии тела подтверждается многочисленными экспериментами. На основе закона взаимосвязи массы и энергии проводятся расчеты выхода энергии в различных ядерных энергетических установках.

Специальная теория относительности, созданная Эйнштейном в 1905 г., стала законченной теорией движения макроскопических тел. Ее применение в теории элементарных частиц указывает на возможное дальнейшее развитие и обобщение этой теории.

### Контрольные вопросы

? В чем состоит закон взаимосвязи массы и энергии?

? В чем состоит закон сохранения массы и энергии?

## 10.11. Связь между полной энергией и импульсом релятивистской частицы

Масса  $m$ , полная энергия  $E$  и импульс  $p$  релятивистских частиц не инвариантны в различных инерциальных системах отсчета. Их значения относительны и изменяются при переходе от одной инерциальной к другой инерциальной системе из-за зависимости массы  $m$  от относительной скорости  $v$  движения инерциальных систем:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c_0^2}}}, \quad E = mc_0^2, \quad p = mv. \quad (326)$$

Но установлено соотношение, которое является *инвариантом* для релятивистской частицы в любой инерциальной системе отсчета:

$$\begin{aligned} E^2 - p^2 c_0^2 &= m^2 c_0^4 - m^2 v^2 c_0^2 = m^2 c_0^4 \left( 1 - \frac{v^2}{c_0^2} \right) = \\ &= \frac{m_0^2}{1 - \frac{v^2}{c_0^2}} c^4 \left( 1 - \frac{v^2}{c_0^2} \right) = m_0^2 c_0^4 = (m_0 c_0^2)^2 = E_0^2, \end{aligned} \quad (327)$$

Следовательно:

$$E^2 - (pc_0)^2 = \text{inv}. \quad (328)$$



Разность квадрата полной энергии и квадрата произведения импульса  $p$  на скорость света  $c_0$  релятивистской частицы — величина инвариантная.

Отсюда следует связь между полной энергией  $E$  релятивистской частицы и ее импульсом  $p$  :

$$E^2 = E_0^2 + p^2 c_0^2 . \quad (329)$$



---

Квадрат полной энергии релятивистской частицы равен сумме квадрата ее энергии покоя и квадрата произведения импульса  $p$  на скорость света в вакууме  $c_0$  .

---



# **ПРИЛОЖЕНИЯ**

---



# ПРИЛОЖЕНИЕ 1

## Справочные данные

Таблица П1. Фундаментальные физические постоянные [4, 43, 61]

Величина	Обозначение	Значение
Гравитационная постоянная*	$G$	$(6,67259 \pm 0,00085) \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$
Масса покоя электрона*	$m_e$	$(9,1093897 \pm 0,0000054) \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Масса Солнца		$2 \cdot 10^{33} \text{ г}$
Постоянная Больцмана*	$k = \frac{R}{N_A}$	$(1,380658 \pm 0,000012) \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$
Постоянная Планка*	$h$	$(6,6260755 \pm 0,0000040) \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Радиус Солнца		$7 \cdot 10^{10} \text{ см}$
Скорость света в вакууме*	$c_0$	$2,99792458 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$
Температура, соответствующая 1 эВ	$T$	11 606 К
Электронвольт		$1,60202 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$
Элементарный заряд (заряд электрона)*	$e$	$(1,60217733 \pm 0,00000049) \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$

\* Значения физических величин, отмеченных таким символом, рекомендованы группой КОДАТА по фундаментальным константам в 1986 г. [61].

Таблица П2. Соотношения энергетических величин

	Волновое число ( $\sigma$ ) см <sup>-1</sup>	Частота ( $\nu$ ) МГц	Энергия (E) эВ	Молярная энергия ( $E_m$ )			Температура (T) К
				$E_h$	кДж·моль <sup>-1</sup>	ккал·моль <sup>-1</sup>	
1/см	1	2,997925·10 <sup>4</sup>	1,239842·10 <sup>-4</sup>	4,556335·10 <sup>-6</sup>	11,96266·10 <sup>-3</sup>	2,85914·10 <sup>-3</sup>	1,438769
МГц	3,33564·10 <sup>-5</sup>	1	4,135669·10 <sup>-9</sup>	1,519830·10 <sup>-10</sup>	3,990313·10 <sup>-7</sup>	9,53708·10 <sup>-8</sup>	4,79922·10 <sup>-5</sup>
электрон- вольт	8065,54	2,417988·10 <sup>8</sup>	1	3,674931·10 <sup>-2</sup>	96,4853	23,0605	1,16045·10 <sup>4</sup>
хартри	219474,63	6,579684·10 <sup>9</sup>	27,2114	1	2625,500	627,510	3,15773·10 <sup>5</sup>
кДж/моль	83,5935	2,506069·10 <sup>6</sup>	1,036427·10 <sup>-2</sup>	3,808798·10 <sup>-4</sup>	1	0,239006	120,272
ккал/моль	349,755	1,048539·10 <sup>7</sup>	4,336411·10 <sup>-2</sup>	1,593601·10 <sup>-3</sup>	4,184	1	503,217
кельвин	0,695039	2,08367·10 <sup>-5</sup>	8,61738·10 <sup>-5</sup>	3,16683·10 <sup>-5</sup>	8,31451·10 <sup>-3</sup>	1,98722·10 <sup>-3</sup>	1

Таблица ПЗ. Некоторые космодромы мира

Космодром	Страна	Расположение	Года	Особенности
"Байконур"	СССР, Россия	СССР/Казахстан	1955	Орбиты с наклоном к плоскости экватора от 48 до 81° при восточном направлении запуска
Восточный испытательный полигон (Eastern Test Range), Атлантический ракетный полигон и Космический центр им. Дж. Ф. Кеннеди	США	Мыс Канаверал (Cape Canaveral) и остров Меррит, Флорида, США	1946	Основной космодром NASA. Пуски с азимутом от 44 до 110°, орбиты с наклоном к плоскости экватора от 28°30' до 54°24' при восточном направлении запуска
Полигон "Капустин Яр"	СССР, Россия	СССР/Россия, граница Астраханской и Волгоградской областей	1946	Первый советский космодром
"Куру" (Kourou)	Франция, ООН, Европейское космическое агентство, Россия	5°18' с. ш., 32 км от Кайенна, Французская (Новая) Гвинея, на берегу Атлантического океана, Южная Америка	1968	Орбиты с наклоном от 0 до 100°. Запланированы старты российских ракет-носителей "Союз"
1-й Государственный испытательный полигон МО РФ "Плесецк"	СССР, Россия	СССР, Россия, Плесецк, Архангельская область	1957	Самый северный космодром мира

Таблица П4. Технические характеристики некоторых летательных аппаратов

Модель	Максимальная (форсажная) тяга, кН/кгс	Максимальная скорость, км·ч <sup>-1</sup> (M)	Максимальная эксплуатационная перегрузка, g
Реактивные истребители, перехватчики, разведчики			
1955 МиГ-19С	2×32,4/3250	1452 (M = 1,462)	8
1958 МиГ-21Ф [SU]	56,3/5740	2175	7
1964 МиГ-25	2×109,8/11200	3000 (M = 2,83)	4,5
1979 МиГ-31	2×152,0/15510	3000 (M = 2,83)	5
1979 McDonnell Douglas F-15C Eagle	2×106,0/10810	2650	9
1981 Су-27	2×122,58/12500	2500 (M = 2,35)	9
1982 МиГ-29	2×86,3/8800	2450 (M = 2,3)	9
1984 General Dynamics F-16C Fighting Falcon	129,0/13155	(M > 2)	9
1985 Су-35	2×137/14000	2440	9
Реактивные стратегические бомбардировщики			
1984 Rockwell International B-1B	4×13962	1328 (M < 1,25)	2,5
1987 Ту-160	4×245/25000	2200 (M = 2,3)	2,5

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

# Словарь терминов, используемых в механике<sup>1</sup>

- **Акселерометр** {**Accelerometer**}. Прибор для измерения ускорений.
- **Анемометр** {**Anemometer**}. Прибор для измерения скорости газовых потоков.
- **Анизотропия упругая** {**Elastic anisotropy**}. Зависимость упругих свойств среды в зависимости от направления распространения света в ней и его поляризации.
- **Аномалия гравитационная (аномалия силы тяжести)** {**Gravity anomaly**}. Разность между значениями силы тяжести, полученными из наблюдений и вычисленными по формуле нормального ее распределения.
- **Антикрыло** {**Antiwing**}. Приспособление в виде крыла, обеспечивающее гоночному автомобилю улучшение обтекаемости и создание вертикальной силы, прижимающей автомобиль к поверхности дороги.
- **Апоцентр** {**Apocentre**}. Точка орбиты небесного тела, наиболее удаленная от центрального тела, вокруг которого оно движется. Для Луны и ИСЗ апоцентр называется апогеем, для искусственных спутников Луны — апо-селением, для планет, комет и других тел, движущихся вокруг Солнца, — афелием.
- **Ареометр** {**Hydrometer**}. Прибор для измерения плотности жидкости.

---

<sup>1</sup> Разные толкования отделяются арабскими цифрами, близкие по смыслу варианты — точкой с запятой, синонимичные варианты — запятой. Переводы на английский/американский язык даны в фигурных скобках. Для экономии места взаимозаменяемые части синонимичных вариантов перевода могут быть заключены в круглые скобки. Факультативная часть термина может быть в тех же целях заключена в квадратные скобки. В словаре частично использованы материалы из: Брюханов А. В., Пустовалов Г. Е., Рыдник В. И. Толковый физический словарь. Основные термины. — М.: Рус. яз., 1988.

- **Аэродина́мика** {**Aerodynamics**}. Раздел аэромеханики, изучающий законы движения газообразной среды и ее взаимодействия с движущимися в ней твердыми телами.
- **Аэродина́мика** {**Aerodynamics**} **автомобиля**. Научная дисциплина, изучающая особенности обтекания автомобиля потоком воздуха.
- **Аэромеха́ника** {**Aeromechanics**}. Раздел механики, изучающий равновесие и движение газообразных сред, а также механическое воздействие этих сред на находящиеся в них твердые тела.
- **Аэроста́тика** {**Aerostatics**}. Раздел аэромеханики, изучающий условия равновесия газов и действия неподвижных газов на покоящиеся в них твердые тела.
- **Барн** {**Barn**}. Единица площади, применяемая для выражения эффективных сечений ядерных процессов.
- **Бева́метр** {**Bevamer**}. Прибор для определения зависимости осадки грунта от приложенной нормальной нагрузки, а также зависимости горизонтальной деформации от приложенной сдвигающей нагрузки.
- **Близкоде́йствие** {**Close-range interaction**}. Представление о том, что взаимодействие между телами осуществляется посредством физического поля и скорость передачи взаимодействия конечна.
- **Вари́ации силы тяжести** {**Gravity variations**}. Непрерывные изменения силы тяжести в данной точке Земли с течением времени.
- **Ватт** {**Watt**}. Единица мощности в СИ.
- **Ве́ктор перемеще́ния** {**Displacement vector**}. Вектор, проведенный из начального положения движущейся точки в положение, где находится точка в данный момент времени (приращение радиус-вектора точки за рассматриваемый промежуток времени). При прямолинейном движении с ростом скорости вектор перемещения совпадает с соответствующим участком траектории и модуль перемещения равен пройденному пути.
- **Ве́ктор систе́мы сил гла́вный** {**Resultant**}. Вектор, равный векторной сумме всех сил, входящих в систему.
- **Величи́на безразме́рная** {**Dimensionless quantity**}. Физическая величина, в размерность которой основные величины входят в степени, равной нулю.
- **Величи́на ве́кторная** {**Vector observation, Vector quantity, Vector variable**}. Физическая величина, характеризующаяся кроме численного значения еще и направлением в пространстве; определяется проекциями на координатные оси, преобразующимися при переходе от одной системы координат к другой так же, как преобразуются проекции направленного отрезка.

- **Величина́ физическая** {**Physical quantity**}. Величина, представляющая собой характеристику свойства и/или состояния материи (вещества или физического поля) или явления и процесса, общую в качественном отношении для многих объектов, но в количественном отношении индивидуальную для каждого объекта; выражается только с использованием шкалы отношений.
- **Вес тела** {**Body weight**}. Сила, с которой тело вследствие тяготения к Земле действует на опору (или подвес), удерживающую тело от свободного падения. Вес проявляется только в том случае, когда на тело кроме силы тяжести действуют еще другие силы, вследствие чего тело движется с ускорением, отличным от ускорения свободного падения. Единица измерения в СИ — ньютон, Н.
- **Весы** {**Balance**}. Прибор для определения массы или веса тела по действующей на него силе тяжести.
- **Весы аэродинамические** {**Aerodynamic balance, [Wind] tunnel balance**}. Прибор для измерения сил и моментов сил, действующих на твердое тело, обтекаемое потоком газа.
- **Весы крутильные** {**Torsion balance**}. Прибор для измерения сил по углу закручивания упругой нити или спиральной пружины, пропорциональному моменту этих сил.
- **Весы пружинные** {**Spring balance**}. Прибор для измерения веса по силе, вызывающей упругую деформацию пружины.
- **Вещество** {**Substance, material, matter**}. Вид материи, обладающий массой покоя.
- **Взаимодействие** {**Interaction**}. Воздействие тел или частиц друг на друга, приводящее к изменению состояния их движения.
- **Взаимодействие гравитационное** {**Gravitational interaction**}. Взаимодействие между любыми телами, выражающееся в их взаимном притяжении с силой, зависящей от масс тел и расстояния между ними.
- **Взаимодействие сильное** {**Strong interaction**}. Взаимодействие, осуществляющееся между адронами при расстояниях менее нескольких фемтометров; приводит, в частности, к связи между нуклонами в атомных ядрах.
- **Взаимодействие слабое** {**Weak interaction**}. Взаимодействие, осуществляющееся между элементарными частицами при расстояниях менее нескольких аттометров; приводит, в частности, к бета-распаду атомных ядер.
- **Взаимодействие электромагнитное** {**Electromagnetic interaction**}. Взаимодействие между электрически заряженными частицами или телами с силой, определяемой их электрическими зарядами, расстоянием между ними и скоростью их относительного движения.

- **Взаимодейств́ия фундаме́нтальные** {**Basic (Fundamental) interaction**}. Четыре взаимодействия, лежащие в основе всех природных процессов, — сильное, электромагнитное, слабое и гравитационное.
- **Вискозиме́тр** {**Viscometer**}. Прибор для определения вязкости.
- **Вискозиме́трия** {**Viscometry**}. Совокупность методов измерения вязкости.
- **Во́лны гравитацйо́нные** {**Gravitational waves; Gravity waves**}. Свободное гравитационное поле, излучаемое ускоренно движущимися массами.
- **Враще́ние** {**Rotation**}. Движение тела, при котором остаются неподвижными одна (вращение вокруг точки) или больше (вращение вокруг оси) точек, жестко связанных с телом.
- **Враще́ние твёрдого те́ла свобо́дное** {**Rigid rotation**}. Вращение твердого тела, при котором неподвижной точкой является его центр инерции.
- **Вре́мя** {**Time**}. Основная физическая величина, характеризующая длительность процесса, интервала и т. д. (единица измерения в СИ — секунда, с).
- **Вре́мя со́бственное** {**Proper time**}. Время, отсчитанное по часам, движущимся вместе с телом.
- **Вырожде́ние** {**Degeneration**}. Физическая величина, характеризующая данную систему (атом, молекулу и т. п.) и имеющая одинаковое значение для различных состояний системы.
- **Вязкость, вну́треннее трéние** {**Viscosity, internal friction**}. Свойство текучих тел (реальных жидкостей и газов) оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой. Свойство твердых тел необратимо поглощать энергию при пластическом деформировании.
- **Вязкость динамическая** {**Dynamic viscosity**}. Количественная характеристика сопротивления жидкости или газа смещению одного слоя относительно другого.
- **Вязкость кинематическая** {**Kinematic viscosity**}. Отношение динамической вязкости к плотности жидкости или газа.
- **Вязкость уда́рная** {**Impact elasticity**}. Поглощение механической энергии твердыми телами в процессе деформации и разрушения под действием ударной нагрузки.
- **Гал** {**Gal**}. В геофизике — внесистемная единица линейного ускорения.
- **Га́мма** {**Gamma**}. Единица массы, используемая при измерении малых масс.
- **Гидроаэродина́мика** {**Fluid dynamics**}. Раздел гидроаэромеханики, изучающий движение жидких и газообразных сред, их взаимодействия между собой и с обтекаемыми ими твердыми телами.

- **Гидродина́мика** {**Hydrodynamics**}. Раздел гидроаэромеханики, изучающий движение несжимаемых жидкостей и взаимодействие их с твердыми телами.
- **Гидроста́тика** {**Hydrostatics**}. Раздел гидроаэромеханики, изучающий равновесие жидкости и воздействие покоящейся жидкости на погруженные в нее тела.
- **Гироско́п** {**Gyroscope**}. 1. Прибор для обнаружения вращения системы отсчета, с которой он связан. 2. Быстро вращающееся твердое тело, ось вращения которого может изменять свое положение в пространстве.
- **Гироско́п неуравнове́шенный (тяжелый)** {**Heavy gyroscope**}. Гироскоп, у которого центр подвеса не совпадает с центром тяжести.
- **Гироско́п свободный** {**Free (Master) gyroscope**}. Гироскоп, для которого вектор момента импульса есть величина постоянная.
- **Гироско́п симметричный** {**Symmetrical gyroscope**}. Гироскоп, обладающий симметрией вращения вокруг оси фигуры гироскопа.
- **Гироско́п у равнове́шенный** {**Balanced (Neutral) gyroscope**}. Гироскоп, центр тяжести которого совпадает с точкой подвеса гироскопа.
- **Гистерезис** {**Hysteresis**}. Неоднозначная зависимость физической величины, характеризующей состояние тела, от физической величины, характеризующей внешние условия.
- **Гистерезис упру́гий** {**Elastic hysteresis**}. Отставание во времени развития деформации упругого тела от приложенного механического напряжения, а также неоднозначная зависимость между деформацией и напряжением.
- **Гравита́ция** {**Gravitation**}. Взаимное притяжение, существующее между любыми телами, обладающими массой.
- **Гравито́н** {**Graviton**}. Квант гравитационного поля, который согласно теоретическим соображениям должен иметь массу покоя и электрический заряд равными нулю, а спин равным двум.
- **Градиэ́нт ско́рости** {**Gradient of velocity**}. Величина, показывающая, как быстро изменяется скорость при переходе от слоя к слою в направлении, перпендикулярном направлению движения слоев.
- **Гра́дус углово́й** {**Degree of arc**}. Единица плоского угла, равная  $1/90$  части прямого угла.
- **Грамм** {**Gram**}. Основная единица массы в системе единиц СГС и дольная (0,001 кг) в СИ; 1 г с точностью до 0,2% равен массе 1 см<sup>3</sup> химически чистой воды при температуре ее наибольшей плотности (около 4 °С).
- **Давле́ние** {**Pressure**}. Физическая величина, характеризующая интенсивность перпендикулярных к поверхности сил, с которыми одно тело дейст-

вует на поверхность другого (например, жидкость на стенки сосуда, газ на поршень). Единица в СИ — паскаль, Па.

- **Давление статическое {Static pressure}**. Полное давление внутри движущихся жидкостей или газов.
- **Дальнодействие {Long-range action}**. Представление о том, что взаимодействие между телами может осуществляться мгновенно непосредственно через пространство, которое не принимает участия в передаче взаимодействия.
- **Двигатель вѣчный пѣрвого рѣда (Перпѣтуум мѣбиле) {Perpetual motion of the first kind}**. Воображаемая машина, которая, будучи раз пущена в ход, совершала бы работу неограниченно долгое время, не потребляя энергии извне.
- **Двигатель реактивный {Jet engine}**. Двигатель, у которого используемая для движения сила тяги, соответствующая реактивной силе вытекающего из него рабочего тела, создается непосредственно на его корпусе.
- **Движение {Motion}**. Перемещение тел в пространстве относительно некоторой системы отсчета.
- **Движение абсолютное {Absolute motion}**. Изменение положения тела со временем по отношению к инерциальной системе отсчета, условно принимаемой за неподвижную.
- **Движение винтовѣе {Helical motion}**. Сложное движение твердого тела, состоящее из прямолинейного поступательного движения и вращательного движения вокруг оси, параллельной вектору скорости поступательного движения.
- **Движение вихревѣе {Vortex (Swirl) motion, Eddy[ing]}**. Движение жидкости или газа, при котором их малые элементы перемещаются не только поступательно, но и вращаются вокруг некоторой мгновенной оси.
- **Движение вращательное {Rotational (Rotary) motion}**. Движение, при котором все точки тела движутся по окружностям, центры которых лежат на одной и той же прямой, называемой осью вращения. Различные точки твердого тела движутся по-разному, поэтому его вращательное движение нельзя охарактеризовать движением какой-то одной точки.
- **Движение механическое {Mechanical motion}**. Перемещение тел или их частей друг относительно друга.
- **Движение относительное {Relative motion}**. Изменение положения тела со временем по отношению к подвижной системе отсчета.
- **Движение переменное {Variable motion}**. Прямолинейное движение точки, при котором численное значение ее скорости является функцией времени.

- **Движение переносное** {**Transportation [motion]**}. Абсолютное движение той малой области подвижной системы отсчета, через которую в данный момент движется рассматриваемая точка.
- **Движение плоское** {**Plane motion**}. Движение, при котором все точки твердого тела перемещаются параллельно некоторой неподвижной плоскости.
- **Движение поступательное** {**Translational motion**}. Движение, при котором любая прямая, жестко связанная с движущимся телом, остается параллельной своему первоначальному положению. При поступательном движении все точки твердого тела движутся одинаково, поэтому поступательное движение можно охарактеризовать движением какой-то произвольной точки тела.
- **Движение равномерное** {**Uniform motion**}. Движение, при котором материальная точка (тело) за любые равные промежутки времени совершает равные перемещения. Скорость при равномерном движении постоянна.
- **Движение равномерное прямолинейное** {**Uniform rectilinear motion**}. Движение с постоянной и по модулю, и по направлению скоростью. Скорость направлена вдоль траектории.
- **Движение равнопеременное** {**Uniformly variable motion**}. Движение материальной точки с постоянным по величине ускорением.
- **Движение равнопеременное прямолинейное** {**Uniformly accelerated rectilinear motion**}. Движение, при котором скорость материальной точки (тела) за любые равные промежутки времени изменяется на равные величины. Это движение с постоянным по модулю и направлению ускорением, причем ускорение направлено вдоль траектории точки. Равнопеременное прямолинейное движение может быть равноускоренным (направление вектора ускорения совпадает с направлением вектора скорости точки; модуль скорости с течением времени возрастает) и равнозамедленным (направление вектора ускорения противоположно направлению вектора скорости; модуль скорости с течением времени уменьшается).
- **Движение реактивное** {**Reaction propulsion**}. Движение, возникающее в результате действия реактивной силы.
- **Движение свободное** {**Free (Unrestricted, Unbounded) motion**}. Движение тела, не ограниченное механическими связями.
- **Девiator деформаций** {**Strain deviator**}. Тензор, определяющий в окрестности точки малую деформацию, не сопровождающуюся изменением объема.
- **Девiator напряжений** {**Stress deviator**}. Тензор, определяющий в точке механические напряжения, не связанные со всесторонним давлением.

- **Деви́ация** {**Deviation**}. Отклонение движения точки от расчетной траектории.
- **Де́йствие** {**Action**}. Физическая величина, имеющая размерность произведения энергии на время и являющаяся одной из характеристик движения системы.
- **Деселе́рометр** {**Decelerometer**}. Прибор для измерений замедлений транспортного средства.
- **Деформа́ция** {**Strain**}. Изменение конфигурации какого-либо объекта в результате внешних воздействий или внутренних сил.
- **Деформа́ция абсолютная** {**Absolute strain**}. Разность между конечным и начальным значениями величины, характеризующей размеры или форму деформируемого тела.
- **Деформа́ция высокоэластическая** {**High-elastic (Hyperelastic) deformation**}. Деформация, приводящая к значительному изменению размеров тела и исчезающая после прекращения действия вызывающей ее силы.
- **Деформа́ция механическая** {**Strain, deformation**}. Изменение взаимного расположения множества частиц материальной среды (преимущественно твердой), которое приводит к изменению формы и размеров тела или его частей и вызывает изменение сил взаимодействия между частицами, т. е. возникновения напряжений.
- **Деформа́ция относительная** {**Relative deformation**}. Отношение абсолютной деформации к первоначальному значению величины, характеризующей размеры или форму тела.
- **Деформа́ция пластическая (оста́точная)** {**Residual (Permanent) deformation**}. Деформация, которая сохраняется в теле после прекращения действия сил.
- **Деформа́ция твердого те́ла** {**Solid body deformation**}. Изменение под действием сил размеров и объема тела, часто сопровождающееся изменением формы тела.
- **Деформа́ция упру́гая** {**Elastic deformation**}. Деформация, при которой после прекращения действия внешних сил тело принимает первоначальные размеры и форму.
- **Джо́уль** {**Joule**}. Единица работы и энергии в СИ.
- **Дина** {**Dyne**}. Единица силы, равная стотысячной доле ньютона.
- **Дина́ма** {**Thrust-and-torque combination**}. Система сил, состоящая из пары сил и силы, перпендикулярной к плоскости, в которой лежит пара.
- **Дина́мика** {**Dynamics**}. Раздел механики, в котором изучаются законы движения тел и причины, которые вызывают это движение.

- **Дина́мика га́зовая** {**Gas dynamics, Gasdynamics**}. Раздел гидроаэродинамики, в котором изучается движение сжимаемых газа и плазмы и их взаимодействие с твердыми телами.
- **Дина́мика релятивистская** {**Relativistic dynamics**}. Раздел механики, изучающий движение тел со скоростями, близкими к скорости света в вакууме.
- **Динамомётр (Си́ломе́р)** {**Dynamometer**}. Прибор для измерения силы или момента силы.
- **Диссипа́ция (рассея́ние) эне́ргии** {**Dissipation of energy**}. Процесс, в котором механическая энергия постепенно уменьшается за счет преобразования в другие (немеханические) формы энергии.
- **Диффузо́р** {**Run-out**}. Расширяющийся участок трубопровода, в котором происходит торможение потока жидкости или газа.
- **Дли́на** {**Length**}. Основная физическая величина, характеризующая расстояние между двумя точками в пространстве. Геометрический параметр, определяющий кратчайшее расстояние между двумя точками в пространстве или на плоскости (единица измерения в СИ — метр, м).
- **Дли́на пу́ти** {**Length**}. Длина участка траектории, пройденного материальной точкой за данный промежуток времени. Длина пути — скалярная величина.
- **Доро́жка вихрева́я (Кармана)** {**Vortex street (trail)**}. Регулярная система вихрей пограничного слоя, образующаяся за телом, обтекаемым потоком жидкости.
- **Единица внесистёмная** {**Arbitrary (Off-system) unit**}. Единица физической величины, не входящая в какую-либо систему единиц.
- **Единица до́льная** {**Submultiple unit**}. Единица физической величины в некоторое число раз (обычно в 10 в какой-либо целой степени) меньшая системной единицы физической величины.
- **Единица кра́тная** {**Multiple unit**}. Единица физической величины в некоторое число раз (обычно в 10 в какой-либо целой степени) бо́льшая системной единицы физической величины.
- **Единица ма́ссы техни́ческая** {**Technical mass unit**}. Единица массы в системе единиц МКГСС.
- **Единица основна́я** {**Basic (Fundamental) unit**}. Произвольно выбранная системная единица физической величины.
- **Единица произво́дная** {**Derived unit**}. Единица физической величины, образуемая из основных единиц с использованием уравнений, связывающих физические величины.

- **Единица системная {System unit}**. Единица физической величины, входящая в какую-либо систему единиц.
- **Единица физической величины (Единица измерения) {Unit [of measurement]}**. Физическая величина, которой по определению присвоено численное значение, равное единице.
- **Жесткость механическая {Mechanical rigidity}**. Способность тела или конструкции сопротивляться деформированию.
- **Жидкость неньютоновская {Non-Newtonian (Complex) liquid}**. Жидкость, вязкость которой не является постоянной величиной.
- **Жидкость ньютоновская {Newtonian (Normal) liquid}**. Жидкость, подчиняющаяся при своем течении закону пропорциональности между касательными напряжениями и скоростью сдвига.
- **Закон Архимеда {Archimedes' principle}**. На всякое тело, погруженное в жидкость (или газ), действует со стороны этой жидкости (газа) выталкивающая сила, равная весу вытесненной телом жидкости (газа), направленная по вертикали вверх и приложенная к центру тяжести вытесненного объема.
- **Закон взаимосвязи массы и энергии {Mass-energy relation}**. Закон релятивистской динамики, согласно которому полная энергия тела равна произведению массы тела на квадрат скорости света.
- **Закон всемирного тяготения {Law of universal gravitation}**. Между любыми двумя материальными точками действует сила взаимного притяжения, пропорциональная произведению масс этих точек и обратно пропорциональная квадрату расстояния между ними.
- **Закон Галилея обобщенный {Galilei's generalized law}**. Все тела в одном и том же поле тяготения падают с одинаковым ускорением.
- **Закон Гука {Hooke's law} для продольного растяжения (сжатия)**. В области упругих деформаций напряжение деформации и относительная линейная деформация пропорциональны.
- **Закон движения точки {Equation of motion of point}**. 1. Зависимость координат точки от времени. 2. Уравнение движения.
- **Закон движения центра масс {Centre of mass motion law}**. Центр масс системы движется как материальная точка, в которой сосредоточена масса всей системы и на которую действует сила, равная геометрической сумме всех внешних сил, действующих на систему.
- **Закон динамики вращательного движения основной {General dynamic law of rotary motion}**. Закон механики, связывающий изменение со временем момента импульса механической системы с главным моментом сил, приложенных к системе.

- **Закон динамики поступательного движения основной** {**General dynamic law of translational motion**}. Закон механики, связывающий изменение со временем импульса системы материальных точек с главным вектором внешних сил, приложенных к системе.
- **Закон изменения физической величины**. Зависимость физической величины от времени.
- **Закон Кулона** {**Coulomb's law**}. 1. Закон, согласно которому сила трения скольжения пропорциональна силе нормального давления. 2. Закон, связывающий силу трения качения с силой нормального давления и радиусом катящегося по плоской поверхности цилиндра или шара.
- **Закон Ньютона второй** {**Newton's second law**}. Ускорение, приобретаемое материальной точкой (телом), пропорционально вызывающей его силе, совпадает с ней по направлению и обратно пропорционально массе материальной точки (тела), т. е. скорость изменения импульса материальной точки равна действующей на нее силе.
- **Закон Ньютона для внутреннего трения (вязкости)** {**Newton's law for internal friction**}. Механизм возникновения внутреннего трения между параллельными слоями газа (жидкости), движущимися с различными скоростями, заключается в том, что из-за хаотического движения происходит обмен молекулами между слоями, в результате чего импульс слоя, движущегося быстрее, уменьшается, а импульс слоя, движущегося медленнее, увеличивается, что приводит к торможению слоя, движущегося быстрее, и ускорению слоя, движущегося медленнее.
- **Закон Ньютона первый (Закон инерции)** {**Newton's first law, Law (Principle) of inertia**}. Существуют такие системы отсчета, относительно которых поступательно движущиеся тела сохраняют свою скорость постоянной, если на них не действуют другие тела (материальная точка (тело) сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока воздействие со стороны других тел не выведет ее (его) из этого состояния).
- **Закон Ньютона третий** {**Newton's third law**}. Всякое действие материальных точек (тел) друг на друга имеет характер взаимодействия; силы, с которыми действуют друг на друга материальные точки, всегда равны по модулю, противоположно направлены и действуют вдоль прямой, соединяющей эти точки.
- **Закон сохранения импульса** {**Law of conservation of momentum**}. Импульс замкнутой системы сохраняется, т. е. не изменяется с течением времени.
- **Закон сохранения и превращения энергии** {**Law of conservation of energy**}. В системе, где действуют неконсервативные силы, например си-

лы трения, полная механическая энергия системы не сохраняется. Энергия никогда не исчезает и не появляется вновь, она лишь превращается из одного вида в другой.

- **Закон сохранения механической энергии** {**Law of conservation of mechanical energy**}. В системе тел, между которыми действуют только консервативные силы, полная механическая энергия сохраняется, т. е. не изменяется со временем (в консервативных системах полная механическая энергия сохраняется).
- **Закон сохранения момента импульса** {**Law of conservation of angular momentum**}. Момент импульса замкнутой системы сохраняется, т. е. не изменяется с течением времени.
- **Закон сохранения релятивистского импульса** {**Law of conservation of relativistic momentum**}. Релятивистский импульс системы сохраняется, т. е. не изменяется с течением времени.
- **Закон сохранения энергии в релятивистской механике** {**Relativistic law of conservation of energy**}. Полная энергия замкнутой системы сохраняется, т. е. не изменяется с течением времени. Этот закон — следствие определенного свойства симметрии — однородности времени.
- **Закон физический** {**Physical law**}. Найденная на опыте или установленная теоретически путем обобщения опытных данных количественная или качественная объективная зависимость одних физических величин от других.
- **Законы Кéплера** {**Kepler's laws**}. Законы движения материальной точки в поле центральной силы, в частности движения планет вокруг Солнца.
- **Замедление времени** {**Retardation of time**}. В теории относительности — замедление хода событий, происходящих в движущейся относительно наблюдателя системе отсчета, по сравнению с их ходом для наблюдателя, который относительно этой системы покоится.
- **Запаздывание текучести** {**Yield lag**}. Явление задержки пластического течения после очень быстрого приложения механического напряжения, превышающего предел текучести.
- **Излучение гравитационное** {**Gravitational radiation**}. Возникающее при неравномерном движении массивных тел свободное гравитационное поле, которое отрывается от своих источников и распространяется в пространстве в виде волн со скоростью света.
- **Измерение** {**Measurement**}. Совокупность действий, выполняемых средствами измерений, для нахождения числового значения измеряемой величины в принятых единицах.
- **Изотропность** {**Isotropy, Isotropism**}. Инвариантность физических законов относительно выбора направления осей координат системы отсчета

(относительно поворота замкнутой системы в пространстве на любой угол).

- **Импульс материальной точки** {**Impulse of material point**}. Векторная величина, численно равная произведению массы материальной точки на ее скорость и имеющая направление скорости.
- **Импульс механический (Количество движения)** {**Momentum, Mechanical momentum**}. Мера механического движения; для материальной точки равен произведению массы этой точки на ее скорость; для системы материальных точек складывается из механических импульсов точек, составляющих систему.
- **Импульс силы** {**Impulse of force**}. Характеристика кратковременно действующей силы, равная произведению силы на время ее действия.
- **Импульс ударный** {**Impact momentum**}. Импульс силы, действующий на каждое из сталкивающихся тел при их ударе.
- **Инвариант** {**Invariant**}. Число или функция, характеризующие свойства объекта, остающиеся неизменными при определенных преобразованиях системы отсчета, в которой рассматриваются эти свойства.
- **Инвариантность** {**Invariance**}. Неизменность физической величины при изменении физических условий.
- **Инертность** {**Inertia**} тел. Свойство, присущее всем телам и заключающееся в том, что тела оказывают сопротивление изменению своей скорости (как по модулю, так и по направлению).
- **Инерция** {**Inertia**}. Свойство тела сохранять состояние покоя или прямолинейного равномерного движения, пока какая-либо внешняя сила не выведет его из этого состояния.
- **Интервал** {**Interval**}. В теории относительности — величина, характеризующая связь между пространственными расстояниями и промежутками времени, разделяющими два события.
- **Килограмм** {**Kilogram**}. Основная единица массы в СИ.
- **Килограмм-сила** {**Kilogram-force**}. Единица силы в системе единиц МКГСС.
- **Кинематика** {**Kinematics**}. Раздел механики, в котором изучается движение тел, не рассматривая причин, которые это движение обуславливают.
- **Кинетика** {**Kinetics**}. Часть механики, включающая динамику и статику.
- **Коллапс гравитационный** {**Gravitational collapse**}. Самопроизвольное сжатие звезды до размеров, меньших, чем ее гравитационный радиус.
- **Конфузор**. Сужающийся участок проточного канала, в котором происходит ускорение потока жидкости или газа.

- **Концентрация напряжений {Stress concentration}**. Увеличение механических напряжений в малых областях, примыкающих к местам с резким изменением формы поверхности тела или его сечения.
- **Координаты обобщенные {Generalized coordinates}**. Независимые параметры любой размерности, однозначно определяющие положение механической системы.
- **Коэффициент вязкости динамический {Coefficient of dynamical viscosity}**. Физическая величина, характеризующая вязкость; в СИ имеет размерность [Па·с].
- **Коэффициент вязкости кинематический {Coefficient of kinematical viscosity}**. Физическая величина, характеризующая вязкость и определяемая отношением динамического коэффициента вязкости данного вещества к его плотности; в СИ имеет размерность [ $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ ], в технической системе единиц — сСт.
- **Коэффициент полезного действия, КПД {Efficiency}**. Отношение отведенной от устройства мощности к мощности, подведенной к устройству.
- **Коэффициент сжатия поперечного (Коэффициент Пуассона) {Poisson's ratio}**. Отношение относительной поперечной деформации к относительной продольной деформации.
- **Коэффициент сопротивления качению {Coefficient of rolling resistance}**. Отношение силы сопротивления перекатыванию тела по некоторой поверхности к силе нормальной реакции со стороны этой поверхности.
- **Коэффициент трения внутреннего {Internal friction coefficient}**. Коэффициент пропорциональности между силой внутреннего трения, действующей на единичную площадку соприкосновения слоев жидкости или газа, и градиентом скорости движения этих слоев.
- **Коэффициент трения качения {Coefficient of rolling friction}**. Отношение момента силы сопротивления перекатыванию тела по некоторой поверхности к силе нормальной реакции со стороны этой поверхности.
- **Коэффициент трения покоя {Coefficient of static friction}**. Отношение силы трения покоя к силе реакции, возникающей при приложении нагрузки, прижимающей одно тело к другому, и направленной перпендикулярно к поверхности их касания.
- **Коэффициент трения скольжения {Coefficient of sliding friction}**. Отношение силы трения скольжения к силе реакции, возникающей при приложении нагрузки, прижимающей одно тело к другому, и направленной перпендикулярно к поверхности их касания.
- **Коэффициент трения скольжения неполного {Coefficient of incomplete sliding friction}**. Отношение неполной силы трения скольжения к силе ре-

акции, возникающей при приложении нагрузки, прижимающей одно тело к другому и направленной перпендикулярно к поверхности их касания.

- **Коэффициенты аэродинамические** {**Aerodynamic coefficients**}. Величины, характеризующие аэродинамические силу и момент, которые действуют на тело, движущееся в жидкости или газе.
- **Кривая потенциальная** {**Potential curve**}. График зависимости потенциальной энергии от некоторого аргумента.
- **Кручение** {**Torsion**}. Деформация, возникающая в закрепленном в каком-либо месте стержня при приложении к нему пары сил, лежащей в плоскости, перпендикулярной к стержню и удаленной от места закрепления.
- **Линии напряженности поля тяготения** {**Lines of gravitational force**}. Линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с вектором напряженности поля тяготения.
- **Линии тока** {**Streamlines**}. Линии, в каждой точке которых касательная к ним совпадает по направлению с вектором скорости жидкости или газа в данный момент времени.
- **Линия действия силы** {**Line of action of a force**}. Прямая, вдоль которой направлен вектор силы.
- **Линия мировая** {**World line**}. Непрерывная линия в четырехмерном пространстве-времени, отображающая последовательность происходящих событий.
- **Линия удара** {**Line of impact**}. Общая нормаль к поверхностям соударяющихся тел в точке их соприкосновения.
- **Масса** {**Mass**}. Основная физическая величина, характеризующая инертность и гравитацию любого материального объекта (единица измерения в СИ — килограмм, кг).
- **Масса гравитационная (тяжелая)** {**Gravitational mass**}. Масса, определяемая законом всемирного тяготения.
- **Масса инертная** {**Inertial mass**}. Масса, определяемая вторым законом Ньютона.
- **Масса покоя** {**Rest mass, Mass at rest**}. Масса тела в системе отсчета, в которой оно покоится.
- **Масса поперечная** {**Transverse mass**}. Инертная масса, определяемая отношением нормальной составляющей силы к нормальному ускорению частицы.
- **Масса приведенная** {**Reduced mass**}. Для относительного движения изолированной системы двух материальных точек — отношение произведения масс точек к их сумме.

- **Ма́сса продольная** {**Longitudinal mass**}. Инертная масса, определяемая отношением тангенциальной составляющей силы к тангенциальному ускорению частицы.
- **Ма́сса релятивистская** {**Relativistic mass**}. Масса, определяемая отношением полной энергии частицы к квадрату скорости света в вакууме.
- **Ма́сса те́ла** {**Mass of a body**}. Физическая величина, являющаяся мерой его инерционных (инертная масса) и гравитационных (гравитационная масса) свойств. Можно считать доказанным, что инертная и гравитационная массы равны друг другу с точностью, не меньшей  $10^{-12}$  их значения.
- **Ме́ра** {**Measure, Standard**}. 1. Количественная характеристика какого-либо объекта или явления. 2. Средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера.
- **Ме́тр** {**Metre, Meter**}. Основная единица длины в СИ.
- **Ме́трика простран́ства–вре́мени** {**Space-time metric**}. В теории относительности — геометрические свойства пространства-времени.
- **Ме́троло́гия** {**Metrology**}. Наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и требуемой точности измерения.
- **Ме́ха́ника** {**Mechanics**}. Раздел физики, в котором изучаются закономерности механического движения и причины, вызывающие или изменяющие это движение.
- **Ме́ха́ника класси́ческая** {**Classical mechanics**} (**ме́ха́ника Галиле́я—Нью́тона**). Раздел механики, в котором изучаются законы движения макроскопических тел, скорости которых малы по сравнению со скоростью распространения света в вакууме.
- **Ме́ха́ника небе́сная** {**Celestial mechanics**}. Раздел механики, занимающийся описанием движения небесных тел.
- **Ме́ха́ника нерелятивистская** {**Nonrelativistic mechanics**}. Механика, описывающая движения тел, скорость которых значительно меньше скорости света.
- **Ме́ха́ника релятивистская** {**Relativistic mechanics**}. Раздел механики, в котором изучаются законы движения макроскопических тел, движущихся со скоростями, сравнимыми со скоростью света в вакууме; основана на специальной теории относительности.
- **Ме́ха́ника сред сплошных** {**Mechanics of continua, Continuum mechanics**}. Раздел механики, изучающий движение и равновесие газов, жидкостей, плазмы и деформируемых тел.
- **Ме́ха́ника сред сыпучих** {**Soil mechanics, Mechanics of bulk media**}. Раздел механики сплошных сред, в котором изучается равновесие и движение сыпучих сред.

- **Механика тел массы переменной** {**Variable mass mechanics**}. Раздел механики, в котором изучаются движения материальных тел с массой, изменяющейся во время их движения.
- **Микрометр** {**Micrometer**}. Одна миллионная метра; обозначается мкм.
- **Микро́н** {**Micron**} (устаревш.). Одна миллионная метра.
- **Ми́нута** {**Minute**}. 1. Внесистемная единица времени. 2. Единица плоского угла, равная  $1/60$  части углового градуса.
- **Многоугольник сил** {**Polygon of forces**}. Графическое построение для определения геометрической суммы системы сил.
- **Модули упругости** {**Elastic major components**}. Величины, характеризующие упругие свойства материала при малых деформациях.
- **Модуль высокоэластический** {**High-elasticity modulus**}. Модуль продольной упругости для каучукоподобных материалов.
- **Модуль сдвига** {**Shear modulus, Rigidity modulus**}. Отношение касательного напряжения в поперечном сечении трубчатого тонкостенного образца к деформации сдвига при его кручении.
- **Модуль упругости** {**Elastic modulus**}. Характеристика сопротивления материала упругой деформации.
- **Модуль упругости объемной (Модуль сжатия всестороннего)** {**Bulk modulus, Compression modulus, Modulus of Dilatation**}. Отношение давления однородного сжатия изотропного тела к относительному изменению его объема.
- **Модуль Юнга** {**Young's modulus**}. Коэффициент пропорциональности, определяемый напряжением, вызывающим относительное удлинение, равное единице.
- **Момент аэродинамический** {**Aerodynamic moment**}. Результирующий момент пары сил, возникающий при движении тела в газовой среде.
- **Момент вращающий** {**Torque**}. Физическая величина, характеризующая внешнее воздействие силы на вращающийся объект; представляет собой произведение момента инерции объекта относительно оси вращения на угловое ускорение объекта.
- **Момент гироскопический** {**Gyroscopic moment**}. Момент пары сил, действующий на ось ротора гироскопа со стороны опоры.
- **Момент импульса относительно неподвижной оси** {**Angular momentum with respect to axis**}. Скалярная величина, равная проекции на эту ось вектора момента импульса, определенного относительно произвольной точки данной оси.

- **Момент импульса относительно неподвижной точки** {**Angular momentum with respect to point**}. Физическая величина, определяемая векторным произведением радиуса-вектора, проведенного из данной неподвижной точки, на вектор импульса.
- **Момент импульса твердого тела относительно оси** {**Angular momentum of solid body with respect to axis**}. Сумма моментов импульса отдельных частиц тела.
- **Момент инерции** {**Moment of inertia**}. Величина, характеризующая инертность тела при непоступательном движении и зависящая от распределения масс в теле.
- **Момент инерции материальной точки относительно данной оси** {**Moment of inertia of material point with respect to axis**}. Скалярная величина, равная произведению массы точки на квадрат расстояния от этой точки до оси.
- **Момент инерции осевой** {**Axial moment of inertia**}. Момент инерции тела при его вращении вокруг оси, совпадающей с осью симметрии тела или параллельной ей оси.
- **Момент инерции системы (тела) относительно данной оси** {**Moment of inertia of system (body) with respect to axis**}. Физическая величина, равная сумме произведений масс материальных точек системы на квадраты расстояний до рассматриваемой оси.
- **Момент инерции центробежный** {**Centrifugal moment of inertia**}. Характеристика динамической неуравновешенности масс при вращении тела.
- **Момент количества движения** {**Angular momentum, Moment of momentum**}. Величина, определяемая суммой произведений количеств движения системы материальных точек на расстояние от этих точек до оси, относительно которой определяется момент количества движения.
- **Момент крутящий** {**Torque**}. Механическая величина, характеризующая внешние воздействия на объект или систему объектов, вызывающие деформации кручения объекта.
- **Момент сил главный** {**Principal force moment**}. Сумма моментов внешних сил, действующих на материальные точки системы, относительно некоторой неподвижной точки.
- **Момент силы** {**Moment of force**}. Физическая величина, определяемая произведением силы на расстояние от линии действия силы до оси, относительно которой рассматривается действие силы.
- **Момент силы относительно неподвижной оси** {**Moment of force with respect to axis**}. Скалярная величина, равная проекции на эту ось вектора момента силы, определенного относительно произвольной точки данной оси.

- **Момент силы относительно неподвижной точки** {**Moment of force with respect to point**}. Физическая величина, определяемая векторным произведением радиуса-вектора, проведенного из данной неподвижной точки в точку приложения силы, на эту силу.
- **Мощность (мгновенная мощность)** {**Power, Instantaneous power**}. Физическая величина, характеризующая скорость совершения работы. Равна отношению произведенной работы или произошедшего изменения энергии к промежутку времени, в течение которого была произведена работа или происходило изменение энергии.
- **Напор** {**Head**}. Отношение энергии некоторого объема потока жидкости к массе жидкости в этом объеме.
- **Напор геометрический** {**Geometric head**}. Удельная потенциальная энергия положения жидкости, определяемая вертикальной координатой.
- **Напор гидростатический** {**Hydrostatic pressure**}. Полная удельная потенциальная энергия жидкости, определяемая суммой геометрического и пьезометрического напоров.
- **Напор полный** {**Total head**}. Напор, определяемый как сумма гидростатического и скоростного напоров.
- **Напор пьезометрический** {**Piezometric head**}. Удельная потенциальная энергия давления жидкости.
- **Напор скоростной (динамический)** {**Velocity (dynamic) head**}. Удельная кинетическая энергия жидкости.
- **Напряжение касательное (тангенциальное)** {**Tangential stress**}. Механическое напряжение, возникающее под действием сил, касательных к поверхности тела.
- **Напряжение механическое** {**Stress**}. Мера внутренних сил, возникающих в деформированном теле, определяемая отношением величины силы к величине площади, на которую действует эта сила.
- **Напряжение нормальное** {**Normal stress**}. Механическое напряжение, возникающее под действием сил, нормальных к поверхности тела.
- **Напряжения контактные** {**Contact stresses**}. Механические напряжения, возникающие на площадках соприкосновения деформируемых тел.
- **Напряжения температурные** {**Temperature (thermal, heat) stresses**}. Механические напряжения, возникающие в теле вследствие различия температур различных его частей и ограничения возможностей теплового расширения со стороны окружающих частей тела или других тел.
- **Напряженность поля гравитационного** {**Gravitational field intensity**}. Отношение силы, с которой гравитационное поле действует на материаль-

ную точку, помещенную в данную точку поля, к величине массы этой материальной точки.

- **Невесомость** {**Zero gravity, Weightlessness**}. Состояние тела, при котором оно движется только под действием силы тяжести.
- **Нутация** {**Nutation**}. Колебания оси гироскопа, накладывающиеся на его прецессию.
- **Ньютон** {**Newton**}. Единица силы в СИ.
- **Обтекатель** {**Fairing**}. Дополнительное устройство на транспортном средстве для уменьшения его лобового сопротивления.
- **Объединение Великое** {**Grand Unification [of interactions]**}. Теоретические модели фундаментальных физических явлений, основанные на представлении о единой природе сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий.
- **Объем** {**Volume**}. Величина, определяемая длиной, шириной и высотой и характеризующая тела с замкнутой поверхностью (единица измерения в СИ — кубический метр, м<sup>3</sup>). Для любого тела объем определяется как общий предел вписанных в него или описанных около него ступенчатых тел.
- **Однородность времени** {**Uniformity of time**}. Инвариантность физических законов относительно выбора начала отсчета времени.
- **Однородность пространства** {**Uniformity of space**}. Свойство симметрии пространства; заключается в том, что при параллельном переносе в пространстве замкнутой системы тел как целого ее физические свойства и законы движения не изменяются, т. е. не зависят от выбора положения начала координат инерциальной системы отсчета.
- **Оси инерции главные** {**Principal axes of inertia**}. Три такие взаимно перпендикулярные оси, проведенные через некоторую точку твердого тела, что при отсутствии внешних сил тело, закрепленное в этой точке и приведенное во вращение вокруг одной из этих осей, будет продолжать вращаться вокруг нее как вокруг неподвижной оси.
- **Ось вращения** {**Axis of rotation**}. Ось, относительно которой совершается вращение или поворот.
- **Ось вращения мгновенная** {**Instantaneous axis of rotation**}. Ось, вокруг которой тело вращается в данный момент.
- **Ось вращения свободная** {**Free axis of rotation**}. Ось вращения, положение которой в пространстве остается неизменным при вращении вокруг нее тела в отсутствие внешних сил.
- **Открытие** {**Discovery**}. Установление неизвестных ранее объективно существующих закономерностей, свойств и явлений материального мира, вносящих коренные изменения в уровень познания.

- **Относительность одновременности** {**Relativity of simultaneity**}. Возможность того, что два или несколько событий, происходящих одновременно для одного наблюдателя, оказываются неодновременными для другого наблюдателя, движущегося относительно первого.
- **Падение свободное** {**Free fall**}. Равноускоренное движение тела без начальной скорости под действием силы тяжести, если сопротивлением среды можно пренебречь.
- **Пара сил** {**Force couple**}. Система двух сил, действующих на твердое тело, равных по величине и направленных параллельно, но в противоположные стороны.
- **Парадокс времени в теории относительности общей (Парадокс близнецов)** {**Clock (twin) paradox**}. Утверждение о том, что часы, начавшие движение относительно некоторой системы отсчета и закончившие движение в той же точке, отстают по сравнению с часами, все время находившимися в этой точке.
- **Парадокс времени в теории относительности специальной** {**Clock paradox**}. Вызванное нестрогостью рассуждений противоречие, заключающееся в том, что часы, связанные с движущейся системой отсчета, отстают от часов, связанных с неподвижной системой, но опережают их, если движущуюся систему считать неподвижной.
- **Параллелограмм сил** {**Parallelogram of forces**}. Геометрическое построение, выражающее закон сложения сил.
- **Паскаль** {**Pascal**}. Единица давления и механического напряжения в СИ.
- **Перемещение** {**Displacement; Movement**}. Вектор, проведенный из положения, которое занимала движущаяся материальная точка в начальный момент некоторого промежутка времени, к положению, которое она занимает в конечный момент этого промежутка.
- **Период вращения** {**Period of revolution**}. Промежуток времени, за который точка совершает один полный оборот, т. е. поворачивается на угол  $2\pi$  ( $360^\circ$ ).
- **Период обращения** {**Period of revolution**}. Промежуток времени, в течение которого вращающееся вокруг оси тело совершает полный оборот.
- **Петля гистерезиса** {**Hysteresis loop**}. Графическое изображение зависимости физической величины, характеризующей состояние тела, от физической величины, характеризующей внешние условия, при периодическом изменении последней, когда состояние тела неоднозначно зависит от внешних условий.
- **Пластичность** {**Plasticity**}. Свойство твердых тел, характеризующее их способность необратимо изменять свои размеры и форму под действием механических нагрузок.

- **Плечó импульса** {**Arm of momentum**}. Длина перпендикуляра, опущенного из точки, относительно которой вычисляется момент импульса, на прямую, вдоль которой направлен импульс.
- **Плечó пары сил** {**Arm of couple; Moment arm**}. Расстояние между прямыми, вдоль которых действуют силы в паре сил.
- **Плечó силы** {**Arm of force**}. Длина перпендикуляра, опущенного из точки, относительно которой вычисляется момент силы, на прямую, вдоль которой действует сила.
- **Плотномéр** {**Densimeter**}. Прибор для измерения плотности жидкости и газа.
- **Плóтность** {**Density**}. Физическая величина, определяемая отношением массы вещества, заключенной в некотором объеме, к величине этого объема (единица измерения в СИ — килограмм на кубический метр,  $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$ ).
- **Плóщадь лобовáя** {**Frontal area**}. Площадь, соответствующая проекции транспортного средства на плоскость, перпендикулярную его продольной оси.
- **Повéрхность удéльная** {**Specific surface**}. Отношение общей площади поверхности пористого или диспергированного в некоторой среде тела к его объему или массе.
- **Повéрхность эквипотенциáльная** {**Equipotential surface**}. Поверхность, для которой потенциал поля тяготения постоянен.
- **Подáтливость** {[**Mechanical**] **compliance**}. Величина, обратная жесткости.
- **Подсистéма квазизáмкнутая** {**Quasi-closed subsystem**}. Часть замкнутой системы, собственная энергия которой в среднем велика по сравнению с энергией ее взаимодействия с остальными частями замкнутой системы.
- **Пóле вéкторное** {**Vector field**}. Физическое поле, описываемое функцией, которая в каждой точке пространства является вектором.
- **Пóле гравитациóнное** {**Gravitational field**}. Силовое поле, посредством которого осуществляются гравитационные взаимодействия.
- **Пóле потенциáльное** {**Potential field**}. Поле, в котором работа, совершаемая действующими силами при перемещении тела из одного положения в другое, не зависит от того, по какой траектории это перемещение произошло, а зависит только от начального и конечного положения тела.
- **Пóле силовóе** {**Field of force**}. Область пространства, в которой действуют силы на внесенные в нее тела.
- **Пóле скалярное** {**Scalar field**}. Физическое поле, описываемое функцией, которая в каждой точке пространства является скаляром.

- **По́ле стациона́рное** {**Stationary field**}. Физическое поле, не изменяющееся со временем.
- **По́ле тяготе́ния** {**Gravity field, Field of gravity**}. Поле, с помощью которого осуществляется гравитационное взаимодействие между телами.
- **По́ле тяготе́ния одноро́дное** {**Homogeneous gravitational field**}. Поле тяготения, векторы напряженности которого во всех точках одинаковы.
- **По́ле тяготе́ния центра́льное** {**Gravity field of central force**}. Поле тяготения, векторы напряженности которого во всех точках поля направлены вдоль прямых, пересекающихся в одной точке, неподвижной по отношению к какой-либо инерциальной системе отсчета.
- **По́ле физическое** {**Physical field**}. Особая форма материи, представляющая собой систему, характеризуемую непрерывным распределением физических величин в пространстве и обладающую бесконечным числом степеней свободы.
- **По́ле центра́льное** {**Central field**}. Силовое поле, в котором направления сил, действующих на произвольно расположенные материальные точки, проходят через один и тот же неподвижный центр.
- **Ползучесть** {**Creep**}. Медленная непрерывная пластическая деформация твердого тела под действием постоянной нагрузки или механического напряжения.
- **Последе́йствие механическое** {**Mechanical aftereffect**}. Изменение деформации тел при неизменных механических напряжениях.
- **Постоянная гравитацфо́нная** {**Gravitational constant**}. Коэффициент пропорциональности в формуле, выражающей закон всемирного тяготения.
- **Потенци́ал по́ля тяготе́ния (Потенци́ал гравитацфо́нный)** {**Potential of a gravity field**}. Скалярная величина, определяемая потенциальной энергией тела массы в данной точке поля. Потенциал — энергетическая характеристика поля тяготения.
- **Пото́к** {**Flow**}. Совокупность частиц движущейся жидкости или газа.
- **Пото́к жидкости** {**Fluid flow**}. Отношение массы жидкости, прошедшей через какую-либо поверхность за некоторый промежуток времени, к величине этого промежутка времени.
- **Преде́л пропорциона́льности** {**Limit of proportionality**}. Механическое напряжение, при превышении которого нарушается пропорциональность между напряжением и деформацией.
- **Преде́л прф́чности** {**Ultimate strength**}. Механическое напряжение, при превышении которого происходит разрушение тела.

- **Предел текучести {Yield strength}**. Механическое напряжение, при превышении которого удлинение образца начинает возрастать без увеличения действующей на него силы.
- **Предел упругости {Limit of elasticity}**. Максимальное механическое напряжение, после снятия которого еще не возникает остаточная деформация образца.
- **Преобразования Галилея {Galilean transformation}**. Уравнения классической механики, связывающие координаты и время движущейся материальной точки в движущихся друг относительно друга инерциальных системах отсчета.
- **Преобразования Лоренца {Lorentz transformation}**. Преобразования, удовлетворяющие постулатам специальной теории относительности.
- **Прецессия {Precession}**. Движение оси вращения твердого тела, при котором она описывает круговую коническую поверхность.
- **Прецессия гироскопа {Precession of gyroscope}**. Вращение оси гироскопа вокруг неподвижной оси.
- **Прецессия гироскопа псевдoreгулярная {Pseudoregular precession of gyroscope}**. Прецессия гироскопа, которая лишь приближенно является регулярной.
- **Прецессия гироскопа регулярная {Regular precession of gyroscope}**. Прецессия гироскопа без нутации.
- **Принцип инвариантности скорости света {Permanence principle of light velocity}**. Скорость света в вакууме не зависит от скорости движения источника света или наблюдателя и одинакова во всех инерциальных системах отсчета.
- **Принцип независимости действия сил (Принцип суперпозиции) {Principle of independence of force action}**. Если на материальную точку действуют одновременно несколько сил, то каждая из этих сил сообщает материальной точке ускорение согласно второму закону Ньютона, как будто других сил нет.
- **Принцип относительности {Principle of relativity}**. Никакие опыты (механические, электрические, оптические), проведенные внутри данной инерциальной системы отсчета, не дают возможности обнаружить, покоится ли эта система или движется равномерно и прямолинейно; все законы природы инвариантны по отношению к переходу от одной инерциальной системы отсчета к другой.
- **Принцип относительности Галилея {Galileo's [relativity] principle}**. Законы классической динамики одинаковы во всех инерциальных системах отсчета.

- **Принцип Сен-Венана** {**Saint-Venant's principle**}. Утверждение, что уравновешенная система сил, приложенная к участку поверхности однородного упругого тела, вызывает в нем напряжения, очень быстро убывающие по мере удаления от этого участка.
- **Принцип эквивалентности гравитационных сил и сил инерции (принцип эквивалентности Эйнштейна)** {**Einstein's principle of equivalence**}. Все физические явления в поле тяготения происходят совершенно так же, как и в соответствующем поле сил инерции, если напряженности полей в соответствующих точках пространства совпадают, а прочие начальные условия для рассматриваемых тел одинаковы. Этот принцип является основой общей теории относительности.
- **Пространство** {**Space**}. Одно из основных понятий физики, при помощи которого описываются свойства протяженности и взаимного расположения объектов.
- **Пространство-время** {**Space-time**}. Объединение в теории относительности пространства и времени в единую сущность.
- **Прóчность** {**Strength**}. Свойство твердых тел сопротивляться разрушению и необратимому изменению формы под действием внешних нагрузок.
- **Прóчность длительная** {**Long-term strength**}. Разрушение материала спустя лишь некоторое время после приложения нагрузок.
- **Пружина** {**Spring**}. Деталь, служащая для временного накопления механической энергии за счет упругой деформации под влиянием нагрузки.
- **Пуáз** {**Poise**}. Единица динамической вязкости в СГС.
- **Путь** {**Path**}. Расстояние между двумя геометрическими точками, отсчитанное вдоль траектории движущейся материальной точки.
- **Пьезóметр** {**Piezometer**}. Прибор для измерения сжатия жидкости под влиянием давления.
- **Рабóта** {**Work**}. Мера преобразования энергии (единица измерения в СИ — джоуль, Дж).
- **Рабóта механическая** {**Mechanical work**}. Работа, измеряемая произведением силы на путь, пройденный телом в направлении действия силы.
- **Рабóта силы** {**Work of a force**}. Работа под действием силы; определяется произведением силы на перемещение и на косинус угла между их направлениями.
- **Рабóта элементарная** {**Elementary work**}. Работа силы на бесконечно малом перемещении ее точки приложения.
- **Равновéсие** {**Equilibrium**}. Состояние физической системы, в котором она при неизменных внешних воздействиях может пребывать сколь угодно долго.

- **Равновéсие безразличное** {**Neutral equilibrium**}. Состояние механической системы, при котором не слишком большие изменения положений точек системы не влекут за собой возникновения сил, стремящихся изменить положения точек.
- **Равновéсие неустóйчивое** {**Unstable equilibrium**}. Равновесие, при котором уже малые возмущения системы приводят к существенному ее отклонению от состояния равновесия и переходу в новое состояние равновесия.
- **Равновéсие систéмы механической** {**Equilibrium of a mechanical system**}. Состояние системы, находящейся под действием сил, при котором все ее точки покоятся по отношению к какой-либо системе отсчета.
- **Равновéсие устóйчивое** {**Stable equilibrium**}. Равновесие, при котором малое возмущение системы приводит к малому ее отклонению от состояния равновесия и через некоторое время вследствие диссипации энергии система обычно возвращается в свое первоначальное состояние.
- **Равнодéйствующая [сила]** {**Resultant force**}. Сила, действие которой эквивалентно действию на тело системы сил.
- **Радиán** {**Radian**}. Единица плоского угла в СИ, равная углу между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу этой окружности.
- **Ра́диус гравитацио́нный** {**Gravitational radius**}. Радиус сферы, в которой сила тяготения, создаваемая массой, лежащей внутри этой сферы, становится бесконечной согласно расчетам общей теории относительности.
- **Ра́диус ине́рции** {**Radius of inertia**}. Величина, имеющая размерность длины, с помощью которой момент инерции тела относительно данной оси выражается произведением массы тела на квадрат этой величины.
- **Ра́диус-вéктор** {**Radius-vector**}. Вектор, направленный в некоторую точку пространства из фиксированной точки.
- **Размéр единицы** {**Size of a unit**}. Количественное содержание физической величины в ее единице.
- **Размéрность величины физической** {**Dimensions of a quality**}. Выражение, показывающее, во сколько раз изменится единица величины при изменении единиц величин, принятых в данной системе единиц за основные.
- **Разно́сть потенциа́лов** {**Potential difference**}. Отношение работы, совершаемой силами потенциального силового поля, действующими на источник поля, при перемещении этого источника между двумя точками поля, к величине, характеризующей источник.
- **Разупрочне́ние** {**Loss of strength**}. Понижение прочности и повышение пластичности предварительно упрочненных материалов.

- **Ракетодина́мика** {**Rocket dynamics**}. Наука о движении летательных аппаратов, снабженных реактивными двигателями, составляющая часть механики тел переменной массы.
- **Растяже́ние** {**Tension**}. Увеличение длины тела призматической формы, вызываемое силой, направленной вдоль продольной его оси.
- **Растяже́ние всестороннее** {**Hydrostatic tension**}. Растяжение, при котором происходит изменение объема тела без изменения его формы.
- **Расхо́д** {**Flow**}. Отношение величины объема или массы газа или жидкости, протекающих за некоторый промежуток времени через поперечное сечение потока, к величине этого промежутка времени.
- **Реа́кция связи** {**Reaction of a constraint**}. Сила, действие которой эквивалентно действию связи, наложенной на механическую систему.
- **Релакса́ция напряже́ний** {**Stress relaxation**}. Происходящее с течением времени самопроизвольное уменьшение механических напряжений в деформированных телах, не сопровождающееся соответствующей деформацией.
- **Реоло́гия** {**Rheology**}. Раздел механики, изучающий необратимые деформации и течение вязких и пластичных материалов, а также релаксацию.
- **Рессо́ра** {**Leaf spring**}. Упругий металлический элемент подвески транспортного средства, состоящий из одного или нескольких длинных листов, работающих на изгиб.
- **Ридберг** {**Rydberg**}. внесистемная единица энергии, применяемая в атомной физике и оптике, равная энергии ионизации атома водорода.
- **Связь о́братная** {**Feedback**}. Обратное воздействие результатов какого-либо процесса на его протекание.
- **Сдвиг** {**Shearing**}. Деформация тела, вызываемая касательными напряжениями.
- **Седимента́ция** {**Sedimentation**}. Направленное движение взвешенных в среде частиц под действием силы тяжести или центробежной силы инерции.
- **Секúнда** {**Second**}. 1. Единица времени в СИ. 2. Единица плоского угла, равная  $1/3600$  части углового градуса.
- **Сжа́тие** {**Compression**}. Уменьшение длины тела призматической формы, вызываемое силой, направленной вдоль его продольной оси.
- **Сжима́емость** {**Compressibility**}. Способность вещества изменять свой объем под действием всестороннего давления.
- **Сила** {**Force**}. Векторная величина, являющаяся мерой механического воздействия на тело со стороны других тел или полей, в результате кото-

рого тело приобретает ускорение или изменяет свою форму и размеры. В каждый момент времени сила характеризуется числовым значением, направлением в пространстве и точкой приложения. Единица измерения в СИ — ньютон, Н.

- **Сила активная {Active force}**. Любая сила, действующая на данный объект, кроме реактивных сил.
- **Сила внешняя {Impressed force}**. Сила, обусловленная действием тел, не входящих в рассматриваемую систему.
- **Сила давлéния нормáльного {Force of normal pressure}**. Составляющая силы, действующей на данное тело со стороны соприкасающегося с ним другого тела, направленная по нормали к поверхности соприкосновения.
- **Сила дéйствующая {Effective force}**. Сила, с которой данный объект действует на взаимодействующий с ним объект.
- **Сила диссипативная {Dissipative force}**. Сила, работа которой при перемещении точки (тела) из одного положения в другое зависит от траектории перемещения точки (тела).
- **Сила инéрции {Force of inertia, Inertial force}**. Вводимый в выражение второго закона Ньютона добавочный член, обусловленный движением неинерциальной системы отсчета относительно инерциальной системы, необходимый для того, чтобы это выражение оставалось справедливым и в неинерциальной системе.
- **Сила инéрции центробéжная {Centrifugal inertial force}**. Сила инерции, действующая на материальную точку в системе отсчета, вращающейся относительно инерциальной системы отсчета, обусловленная центростремительным переносным ускорением.
- **Сила консервативная (потенциáльная) {Conservative force}**. Сила, работа которой при перемещении точки (тела) зависит только от начального и конечного положения в пространстве.
- **Сила кориолисова {Coriolis force}**. Сила инерции, действующая на материальную точку в неинерциальной системе отсчета, движущейся непоступательно относительно инерциальной системы, и обусловленная кориолисовым ускорением.
- **Сила Ма́гнуca {Magnus force}**. Сила, действующая на тело, вращающееся в набегающем на него потоке жидкости или газа, направленная перпендикулярно к потоку и оси вращения.
- **Сила ма́ссовая (объёмная) {Mass (Volume) force}**. Равнодействующая сил, приложенных к частицам тела, при условии, что силы, действующие на частицы, пропорциональны их массам и имеют одинаковые направления.

- **Сила обобщенная** {**Generalized force**}. Величина, играющая роль обычной силы, когда положение механической системы определяется обобщенными координатами.
- **Сила повёрхностная** {**Surface force**}. Сила, приложенная к поверхности тела.
- **Сила подъемная** {**Lifting force**}. Составляющая полной силы давления на движущееся в газе или жидкости тело, направленная перпендикулярно к скорости тела.
- **Сила равнодэйствующая** {**Resultant force**}. Сила, действие которой эквивалентно действию на тело системы сил.
- **Сила реактивная** {**Reactive force**}. Сила, действующая на данный объект со стороны опоры и приложенная к этому объекту, например, вертикальная, продольная и поперечная реакции дороги, приложенные к колесу автомобиля.
- **Сила трéния** {**Frictional force**}. Сила, препятствующая относительному перемещению соприкасающихся тел, слоев жидкости или газа.
- **Сила трéния качéния** {**Force of rolling friction**}. Сила трения, действующая на цилиндрическое или шарообразное тело, катящееся без скольжения по плоской или изогнутой поверхности.
- **Сила трéния непóлная** {**Incomplete force of friction**}. Составляющая силы, действующая на данное тело со стороны соприкасающегося с ним другого тела, направленная по касательной к поверхности соприкосновения, в случае если эти тела неподвижны друг относительно друга.
- **Сила трéния покóя** {**Force of static friction**}. Сила трения, препятствующая возникновению движения одного тела по поверхности другого.
- **Сила трéния скольжéния** {**Force of sliding friction**}. Сила, пропорциональная силе нормального давления, с которого одно тело действует на другое.
- **Сила тяжести** {**Force of gravity, Gravitational force**}. Сила, которая действует на тело, находящееся в системе отсчета, связанной с Землей; равнодействующая силы тяготения тела к Земле и центробежной силы инерции, обусловленной вращением Земли.
- **Сила упругости** {**Elastic force**}. Сила, возникающая при деформации тела и направленная противоположно направлению смещения частиц при деформации.
- **Сила центробежная** {**Centrifugal force**}. Сила реакции, с которой движущаяся материальная точка действует на тела (связи), стесняющие свободу ее движения и вынуждающие ее двигаться криволинейно.

- **Сила центростремительная {Centripetal force}**. Направленная к центру кривизны траектории точки составляющая суммы всех сил, действующих на точку.
- **Силы внешние {External forces}**. Силы, с которыми на материальные точки механической системы действуют внешние тела.
- **Силы внутренние {Internal forces}**. Силы взаимодействия между материальными точками механической системы.
- **Силы стационарные {Stationary forces}**. Силы, не зависящие от времени.
- **Силы трения {Frictional forces}**. Тангенциальные силы, возникающие при соприкосновении поверхностей тел и препятствующие их относительному перемещению. Силы трения могут быть разной природы, но в результате их действия механическая энергия всегда превращается во внутреннюю энергию соприкасающихся тел.
- **Силы упругие {Elastic forces}**. 1. Внутренние силы, возникающие в деформируемом теле. 2. Силы, действующие со стороны тел, испытывающих упругую деформацию, на находящиеся в контакте с ними тела.
- **Симметрия законов физических {Symmetry of physical laws}**. Инвариантность физических законов, устанавливающих соотношения между характеристиками систем или их изменениями со временем, существующая при определенных преобразованиях, которым могут быть подвергнуты системы.
- **Симплекс {Simplex}**. Отношение двух однородных физических величин.
- **Система голономная {Holonomic system}**. Механическая система, в которой действуют только голономные связи.
- **Система динамическая {Dynamic system}**. Механическая система конечного числа материальных точек или твердых тел, движущаяся по законам классической динамики.
- **Система дискретная (Система с сосредоточенными параметрами) {Lumped parameter system}**. Система, которую для описания происходящих в ней процессов можно рассматривать как совокупность конечного числа точечных объектов или объектов, сводимых к точечным.
- **Система диссипативная {Dissipative system}**. Система, в которой механическая энергия постепенно уменьшается за счет преобразования в другие (немеханические) формы энергии.
- **Система единиц {System of units}**. Совокупность основных и производных единиц некоторой системы физических величин, образованная на основе физической теории, отражающих существующую в природе взаимосвязь физических величин.

- **Система единиц абсолютная {Absolute system of units}**. 1. Система единиц, содержащая ограниченное число основных единиц. 2. Система единиц, в которой основными механическими единицами являются единицы длины, массы и времени. 3. Система единиц, в которой за основные единицы приняты сантиметр, грамм и секунда.
- **Система единиц гауссова (симметричная) {Gaussian system of units}**. Абсолютная система единиц электрических и магнитных величин с основными единицами сантиметр, грамм и секунда, в которой диэлектрическая и магнитная проницаемости являются безразмерными величинами, в случае вакуума равными 1.
- **Система единиц Джорджи {Giorgi system of units}**. Система единиц, в которой основными единицами являются метр, килограмм и секунда, и одна из электродинамических единиц.
- **Система единиц динамическая {Dynamic system of units}**. Система единиц, в которой в число основных величин входит единица массы, а единица силы является производной и определяется с помощью второго закона Ньютона.
- **Система единиц естественная {Natural unit system}**. Система единиц, в которой размер основных единиц определяется явлениями природы, что достигается выбором в качестве основных единиц фундаментальных физических постоянных.
- **Система единиц когерентная {Coherent system of units}**. Система единиц, в которой уравнения, служащие для определения одних единиц через другие, уже установленные, содержат только безразмерные коэффициенты пропорциональности, равные 1.
- **Система единиц международная (СИ) {International system of units}**. Система единиц, в которой в качестве основных единиц приняты: метр, килограмм, секунда, а также ампер, кельвин, кандела и моль.
- **Система единиц МКС {Rationalized mks system}**. Система единиц механических величин, в которой в качестве основных единиц приняты метр, килограмм и секунда.
- **Система единиц МКСА {Mksa system}**. Система единиц Джорджи, в которой в качестве основной электродинамической единицы принят ампер.
- **Система единиц МКСAn {Unrationalized mksa system}**. Нерационализованная система единиц МКСА.
- **Система единиц МКСAr {Rationalized mksa system}**. Рационализованная система единиц МКСА.
- **Система единиц Планка {Planck's system of units}**. Естественная система единиц, в которой в качестве основных единиц взяты скорость света в

вакууме, гравитационная постоянная, постоянная Больцмана и постоянная Планка.

- **Система единиц рационализованная {Rationalized system}**. Система единиц, в которой установление уравнений, служащих для получения производных единиц, осуществляется на основе уравнений Максвелла, записанных так, что они не содержат коэффициентов вида  $4\pi$ .
- **Система единиц СГС {Cgs system}**. Абсолютная система единиц механических величин (за основные единицы приняты сантиметр, грамм и секунда).
- **Система единиц СГСМ (магнитная, электромагнитная) {Cgs electromagnetic system}**. Абсолютная система единиц, в которой единицы электродинамических величин являются производными и определяются при помощи закона Кулона, причем магнитная проницаемость считается безразмерной величиной, в случае вакуума равной 1.
- **Система единиц СГСЭ (электростатическая) {Cgs electrostatic system}**. Абсолютная система единиц, в которой единицы электродинамических величин являются производными и определяются при помощи закона Кулона, причем диэлектрическая проницаемость считается безразмерной величиной, в случае вакуума равной 1.
- **Система единиц СГС $\epsilon_0$  {Cgs $\epsilon_0$  system}**. Система единиц механических и электродинамических величин, в которой в качестве основных единиц приняты сантиметр, грамм, секунда и диэлектрическая проницаемость вакуума.
- **Система единиц СГС $\mu_0$  {Cgs $\mu_0$  system}**. Система единиц механических и электродинамических величин, в которой в качестве основных единиц приняты сантиметр, грамм, секунда и магнитная проницаемость вакуума.
- **Система единиц техническая (МКГСС) {Mk force system}**. Устаревшая система единиц механических величин, в которой в качестве основных единиц приняты: метр, килограмм-сила и секунда.
- **Система единиц Хартри {Hartree System of Units}**. Одна из естественных систем единиц с основными единицами: заряд и масса электрона, радиус первой боровской орбиты атома водорода ( $0,5292 \cdot 10^{-8}$  см), постоянная Планка. В этой системе единица времени составляет  $2,419 \cdot 10^{-17}$  с, единица энергии (хартри) —  $4,359 \cdot 10^{-11}$  эрг. Применение системы единиц Хартри позволяет упростить запись уравнений квантовой механики.
- **Система замкнутая {Closed system}**. Механическая система тел, на которую не действуют внешние силы.
- **Система измерительная {Measuring system}**. Совокупность измерительных приборов, измерительных преобразователей и средств переработки получаемой с их помощью информации, работающая как целое.

- **Система изолированная {Isolated system}**. Система, не подвергающаяся никаким внешним воздействиям.
- **Система консервативная {Conservative system}**. Механическая система, на тела которой действуют только консервативные силы.
- **Система линейная {Linear system}**. Система, параметры которой не зависят от переменных величин, характеризующих ее состояние, а сами переменные величины удовлетворяют принципу суперпозиции.
- **Система мер метрическая {Metric system}**. Совокупность единиц физических величин, в основу которой положены метр и килограмм.
- **Система механическая {Mechanical system}**. Мысленно выделенная совокупность материальных точек, движущихся согласно законам классической механики и взаимодействующих друг с другом и с телами, не включенными в состав этой совокупности.
- **Система нелинейная {Nonlinear system}**. Система, параметры которой зависят от переменных величин, характеризующих ее состояние.
- **Система отсчета {Reference system}**. Совокупность тела отсчета, связанной с ним системы координат и синхронизированных между собой часов.
- **Система отсчета абсолютная (неподвижная) {Absolute frame of reference}**. Инерциальная система отсчета, условно принятая за неподвижную.
- **Система отсчета гелиоцентрическая {Heliocentric frame of reference}**. Система отсчета, связанная с Солнцем.
- **Система отсчета геоцентрическая {Geocentric frame of reference}**. Система отсчета, связанная с Землей.
- **Система отсчета инерциальная {Inertial system of reference}**. Система отсчета, относительно которой материальная точка, не подверженная воздействию других тел, движется равномерно и прямолинейно, т. е. по инерции.
- **Система отсчета лабораторная (Л-система) {Laboratory frame of reference}**. Система отсчета, связанная с измерительными приборами.
- **Система отсчета неинерциальная {Noninertial frame of reference}**. Система отсчета, движущаяся относительно инерциальной системы отсчета с ускорением.
- **Система отсчета относительная (подвижная) {Relative frame of reference (Moving system)}**. Система отсчета, движущаяся по отношению к абсолютной системе отсчета.
- **Система свободная {Free system}**. Механическая система, не имеющая внешних связей.

- **Система физическая** {**Physical system**}. Система, рассматриваемая со стороны физических свойств объектов.
- **Склерометр** {**Sclerometer**}. Прибор для определения твердости материалов методами царапания или вдавливания.
- **Скорость** {**Velocity, Rate, Speed**}. Векторная величина, которая определяет быстроту движения и его направление в данный момент времени.
- **Скорость абсолютная** {**Absolute velocity**}. Скорость движения точки по отношению к абсолютной системе отсчета.
- **Скорость движения точки (Скорость линейная)** {**Velocity of travel, Speed of motion (Linear velocity)**}. Характеристика движения точки, определяемая отношением ее перемещения к промежутку времени, в течение которого произошло это перемещение.
- **Скорость космическая вторая (параболическая)** {**Escape speed, Escape velocity**}. Наименьшая скорость, которую надо сообщить телу, чтобы оно могло преодолеть притяжение Земли и превратиться в спутник Солнца, т. е. чтобы его орбита в поле тяготения Земли стала параболической.
- **Скорость космическая первая (круговая)** {**Orbital (Circular) velocity, Orbital speed**}. Минимальная скорость, которую надо сообщить телу, чтобы оно могло двигаться вокруг Земли по круговой орбите, т. е. превратиться в искусственный спутник Земли.
- **Скорость космическая третья** {**Solar escape velocity**}. Скорость, которую необходимо сообщить телу на Земле, чтобы оно покинуло пределы Солнечной системы, преодолев притяжение Солнца.
- **Скорость мгновенная** {**Instantaneous speed**}. Векторная величина, определяемая производной радиуса-вектора движущейся точки по времени. Эта скорость направлена по касательной к траектории в сторону движения.
- **Скорость обобщенная** {**Escape velocity**}. Полная производная по времени от обобщенных координат системы.
- **Скорость относительная** {**Relative velocity**}. 1. Скорость движения точки по отношению к относительной системе отсчета. 2. Составляющая абсолютной скорости, обусловленная относительным движением точки.
- **Скорость переносная** {**Reference-frame velocity**}. 1. Скорость точек относительной системы отсчета по отношению к абсолютной системе отсчета. 2. Составляющая абсолютной скорости точки, обусловленная переносным движением.
- **Скорость релятивистская** {**Relativistic velocity**}. Скорость движения частицы, близкая к скорости света в вакууме, при которой отчетливо про-

являются эффекты, предсказываемые специальной теорией относительности.

- **Скорость света в вакууме** {**Velocity of light in vacuum**}. Скорость распространения любых электромагнитных волн и предельная скорость распространения любых физических воздействий; фундаментальная физическая постоянная.
- **Скорость секториальная** {**Sector velocity**}. Отношение площади, заметаемой радиусом-вектором точки при ее движении, к промежутку времени, за который эта площадь заметена.
- **Скорость средняя** {**Mean velocity, Average speed**} движущейся точки за промежуток времени. Векторная величина, равная отношению перемещения к промежутку времени, в течение которого это перемещение произошло.
- **Скорость угловая тела твердого** {**Angular velocity**}. Вектор, определяемый первой производной угла поворота тела по времени и направленный вдоль оси по правилу правого винта.
- **Скорость угловая точки** {**Angular velocity of a mass point**}. Отношение угла поворота радиуса-вектора точки к промежутку времени, за который произошел этот поворот.
- **След спутный** {**Wake**}. Протяженная область подторможенной жидкости или газа, возникающая за обтекаемым телом.
- **Сложение сил** {**Composition of forces**}. Операция определения главного вектора системы сил.
- **Слой нейтральный** {**Neutral layer**}. Слой, волокна которого не изменяют своей длины при изгибе образца.
- **Слой пограничный** {**Boundary layer**}. Область течения вязкой жидкости или вязкого газа с малой толщиной, образующаяся у поверхности обтекаемых тел, стенок канала или на границе раздела двух потоков жидкости с различными скоростями, температурой или химическим составом.
- **Сопrotивление аэродинамическое (лобовое)** {**Aerodynamic drag, Head resistance**}. Сопrotивление воздуха, зависящее от размеров и формы движущегося объекта.
- **Сопrotивление гидравлическое** {**Hydrodynamic drag**}. Сопrotивление течению жидкостей и газов.
- **Спойлер** {**Spoiler**}. Дополнительная деталь на кузове, снижающая его аэродинамическое сопротивление.
- **Статика** {**Statics**}. Раздел механики, в котором изучаются законы равновесия системы тел. Законы статики не рассматриваются отдельно от законов динамики.

- **Струя {Jet}**. Форма течения жидкости или газа, при которой они текут в среде с отличающимися от них параметрами.
- **Твердое тело {Solid}**. Агрегатное состояние вещества, характеризующееся стабильностью формы и характером теплового движения атомов, которые совершают малые колебания вокруг положений равновесия.
- **Твердость {Hardness}**. Свойство материала, характеризующее его способность сопротивляться местной пластической деформации, возникающей при внедрении в него более твердого тела.
- **Текучесть {Yield, Flow}**. 1. Свойство тел пластически или вязко деформироваться под действием напряжений; характеризуется величиной, обратной вязкости. 2. Физическая величина, обратная динамической вязкости.
- **Тело {Body}**. Форма пространственного существования вещества в макромире.
- **Тело неупругое абсолютно {Perfectly inelastic body}**. Тело, полностью сохраняющее деформированное состояние после прекращения действия внешних сил.
- **Тело отсчета {Reference body}**. Произвольно выбранное тело, относительно которого определяется положение других движущихся тел. Положение любого движущегося тела определяется по отношению к телу отсчета, поэтому механическое движение относительно.
- **Тело твердое абсолютно {Perfectly rigid body}**. Тело, которое ни при каких условиях не может деформироваться, и при всех условиях расстояние между двумя точками (частицами) этого тела остается постоянным.
- **Тело упругое абсолютно {Perfectly elastic body}**. Тело, деформация которого подчиняется закону Гука, а после прекращения действия внешних сил принимает свои первоначальные размеры и форму.
- **Тензoметр {Strain gauge}**. Прибор для измерения деформации нагруженных деталей.
- **Тензoметрия {Strain measurement}**. Измерение напряжений, возникающих в деталях, с помощью тензoметров или тензoметрических датчиков.
- **Теорема Штейнера {Steiner theorem}**. Момент инерции тела относительно любой оси вращения равен моменту его инерции относительно параллельной оси, проходящей через центр масс тела, сложенному с произведением массы тела на квадрат расстояния между осями.
- **Термоанемометр {Hot-wire anemometer}**. Прибор для измерения скорости течения жидкости или газа, действие которого основано на зависимости между скоростью течения и теплоотдачей нагретой проволоки, помещенной в поток.

- **Тече́ние {Flow}**. Движение жидкости (газа).
- **Тече́ние ламина́рное (слоистое) {Laminar flow}**. Течение жидкости (газа), при котором вдоль потока каждый выделенный тонкий слой скользит относительно соседних, не перемешиваясь с ними.
- **Тече́ние турбуле́нтное (вихрево́е) {Turbulent flow}**. Течение жидкости (газа), при котором вдоль потока происходит интенсивное вихреобразование и перемешивание жидкости (газа).
- **Тече́ние установившееся (стаціона́рное) {Stationary flow}**. Течение жидкости (газа), при котором форма и расположение линий тока, а также значения скоростей в каждой ее точке со временем не изменяются.
- **Торсио́н {Torsion bar}**. Упругий металлический элемент подвески транспортного средства в виде вала, одним концом закрепленного на раме или кузове, работающий на кручение.
- **Траекто́рия движе́ния материáльной то́чки {Trajectory of a point}**. Линия, описываемая материальной точкой в пространстве. В зависимости от формы траектории движение может быть прямолинейным или криволинейным.
- **Тре́ние вnéшнее (сухо́е) {External (Contact) friction, Dry friction}**. Трение, возникающее в плоскости касания двух соприкасающихся тел при их относительном перемещении.
- **Тре́ние вну́треннее {Internal friction}**. Трение между частями одного и того же тела, например, между разными слоями жидкости или газа, скорость которых изменяется от слоя к слою. Свойство твердых тел при их деформации необратимо поглощать механическую энергию.
- **Тре́ние жидкостное {Friction of fluid lubrication}**. Трение скольжения, при котором трущиеся поверхности разделены слоем смазки, исключаящим касание неровностей.
- **Тре́ние качéния {Rolling friction}**. Внешнее трение, возникающее при качении одного тела по поверхности другого.
- **Тре́ние кинематическое {Kinetic (dynamic) friction}**. Внешнее трение между движущимися телами.
- **Тре́ние покоя́ {Friction of rest}**. Трение при отсутствии относительного перемещения соприкасающихся тел.
- **Тре́ние скользя́ния {Sliding friction}**. Трение при относительном перемещении соприкасающихся тел.
- **Тре́ние статическое {Static friction}**. Внешнее трение между неподвижными телами.
- **Тре́ние сухо́е {Dry friction}**. Трение скольжения между двумя твердыми телами, поверхности которых не подвергаются смазке.

- **Трибология** {**Tribology**}. Научное направление, изучающее взаимодействие поверхностей, движущихся одна относительно другой и испытывающих взаимное трение.
- **Трибометрия** {**Tribometry**}. Совокупность методов измерения коэффициентов трения и износа.
- **Труба аэродинамическая** {**Wind tunnel**}. Установка, создающая поток воздуха или другого газа для экспериментального изучения явлений, сопровождающих обтекание тел.
- **Трубка тока** {**Fluid tube**}. Часть жидкости, ограниченная линиями тока.
- **Удар (соударение)** {**Impact, Impaction**}. Столкновение двух или более тел, при котором взаимодействие длится очень короткое время.
- **Удар неупругий абсолютно** {**Absolutely inelastic impact**}. Столкновение двух тел, в результате которого тела объединяются, двигаясь дальше как единое целое.
- **Удар упругий абсолютно** {**Absolutely elastic impact**}. Идеализированный случай столкновения двух тел, в результате которого в обоих взаимодействующих телах не остается никаких деформаций и вся кинетическая энергия, которой обладали тела до удара, после удара вновь превращается в кинетическую энергию.
- **Удар косой** {**Oblique impact**}. Удар, при котором скорости центров инерции соударяющихся тел перед ударом не параллельны линии удара.
- **Удар прямой** {**Head-on impact**}. Удар, при котором скорости центров инерции соприкасающихся тел перед ударом параллельны линии удара.
- **Удар упругий** {**Elastic collision**}. Удар, при котором суммарная кинетическая энергия соударяемых тел после удара такая же, как до удара.
- **Удар центральный** {**Centric impact**}. Удар, при котором тела до удара движутся вдоль прямой, проходящей через их центры масс.
- **Упругость** {**Elasticity**}. Свойство тел изменять форму и размеры под действием нагрузок и самопроизвольно восстанавливать исходную конфигурацию при прекращении внешних воздействий.
- **Ускорение** {**Acceleration**}. Физическая величина, характеризующая быстроту изменения скорости движения материальной точки и равная отношению изменения скорости к промежутку времени, в течение которого это изменение произошло (единица измерения в СИ — метр на секунду в квадрате,  $\text{м}\cdot\text{с}^{-2}$ ).
- **Ускорение касательное** {**Tangential acceleration**}. Составляющая ускорения точки, направленная по касательной к ее траектории.
- **Ускорение мгновенное** {**Instantaneous acceleration**}. Векторная величина, определяемая первой производной скорости по времени.

- **Ускорéние нормáльное** {**Normal acceleration**}. Составляющая ускорения точки, направленная по нормали к ее траектории.
- **Ускорéние свободного падения** {**Free fall acceleration**}. Ускорение, приобретаемое материальной точкой под действием силы тяжести.
- **Ускорéние срéднее** {**Mean acceleration**} **неравномерного движения за промежуток времени**. Векторная величина, равная отношению изменения скорости к промежутку времени, за которое это изменение произошло.
- **Ускорéние угловóе** {**Angular acceleration**}. Вектор, определяемый первой производной угловой скорости по времени.
- **Хрúпкость** {**Brittleness**}. Свойство материала разрушаться при небольшой (преимущественно упругой) деформации под действием напряжений, средний уровень которых ниже предела упругости.
- **Центр инéрции (масс)** {**Centre of inertia (mass)**}. Центр, в котором условно сосредоточена масса механической системы.
- **Центр тяжести** {**Centre of gravity**}. Неизменно связанная с твердым телом точка, через которую проходит равнодействующая всех элементарных сил тяжести, действующих на частицы этого тела при любом положении тела в пространстве, если эта точка существует. У однородного тела, имеющего центр симметрии (круг, шар, куб и т. д.), центр тяжести находится в центре симметрии тела. Положение центра тяжести твердого тела в однородном поле тяжести совпадает с положением его центра масс.  
Условие существования центра тяжести — однородность гравитационного поля в области пространства, занятой телом. В земных условиях это выполняется для тел, размеры которых много меньше размеров Земли.
- **Центрифúга** {**Centrifuge**}. Устройство для разделения смеси на составные части под действием центробежных сил.
- **Частотá** {**Frequency**}. Физическая величина, характеризуемая отношением числа полных циклов какого-либо периодического процесса к промежутку времени, в течение которого совершается это число циклов.
- **Частотá вращéния** {**Rotation frequency**}. Частота равномерного вращательного движения твердого тела вокруг оси.
- **Частотá круговáя (циклическая)** {**Circular frequency**}. Частота гармонических колебаний, умноженная на  $2\pi$ .
- **Числó Máха** {**Mach number**}. Отношение скорости движения тела в среде к скорости звука в той же среде.
- **Числó Рейнóльдса** {**Reynold's number**}. Критерий подобия для течения вязких жидкостей и газов, характеризующий соотношение между силами инерции и силами внутреннего трения.

- **Число степеней свободы {Number of degrees of freedom}**. Число независимых возможных движений механической системы.
- **Экологизация {Ecologization}**. Рассмотрение каких-либо вопросов с учетом экологических факторов, экологический подход к решению каких-либо проблем.
- **Экология {Ecology}**. Наука о взаимоотношениях живых организмов между собой и с окружающей средой.
- **Экология промышленная {Industrial ecology}**. Наука о взаимодействии объектов хозяйственной деятельности человека с окружающей средой.
- **Экология транспортная {Transport ecology}**. Наука о взаимодействии объектов транспорта с окружающей средой.
- **Энергия {Energy, Power}**. Универсальная мера различных форм движения и взаимодействия.
- **Энергия кинетическая {Kinetic energy} механической системы**. Энергия механического движения системы, равная для материальной точки половине произведения массы этой точки на квадрат ее скорости.
- **Энергия механическая {Mechanical energy}**. Энергия механического движения и взаимодействия тел.
- **Энергия покоя (Энергия собственная) {Rest energy (Self-energy)}**. Энергия тела в системе отсчета, относительно которой тело покоится; равна произведению массы покоя тела на квадрат скорости света.
- **Энергия полная {Total energy}**. Сумма энергии покоя и кинетической энергии движущегося тела.
- **Энергия потенциальная {Potential energy}**. Механическая энергия системы тел, определяемая их взаимным расположением и характером сил взаимодействия между ними.
- **Энергия потенциальная упругорастянутого (упругосжатого) стержня {Potential energy of elastic bar}**. Энергия, равная работе, совершаемой внешними силами при деформации упругого стержня.
- **Эталон {Standard}**. Средство измерений, обеспечивающее воспроизведение, хранение узаконенной единицы физической величины, а также передачу размера единицы другим средствам измерений.

# ПРИЛОЖЕНИЕ 3

## Историческая справка

Таблица П5. Краткая хронология истории механики

Дата	Событие	Автор(ы)
3000 до н. э.	Определение продолжительности года	
1880 до н. э.	Применение смазки в технике	Египет
1400 до н. э.	Изобретение безмена	Египет
540 до н. э.	Шарообразная форма Земли	Пифагор
350 до н. э.	Идея вращения Земли	Гераклид
1543	Теория гелиоцентрической системы мира	Коперник
1699	Два закона движения планет	Кеплер
1638	Закон свободного падения	Галилей
22.06.1675	Английский король Карл II основал обсерваторию в Гринвиче. В конце XIX в. международное сообщество пришло к согласию считать проходивший через нее меридиан нулевым	Карл II
1680–1987	Основные законы классической механики, закон всемирного тяготения. Тождественность силы тяжести на Земле и межпланетных сил тяготения. Применение дифференциального и интегрального исчисления в механике	Ньютон
1687	Основной закон вязкого течения	Ньютон
1726	Закон Бернулли	Бернулли
1754	На конференции Академии наук М. В. Ломоносов "показал изобретенную им машину, называемую им аэродромической (воздухобежной)". Это была первая в России действующая модель вертолета; она поднималась на небольшую высоту	Ломоносов

Таблица П5 (продолжение)

Дата	Событие	Автор(ы)
1783	Первая публичная демонстрация воздушного шара	братья Монгольфье
1804	Первый в мире полет на воздушном шаре с научными целями состоялся в Санкт-Петербурге	Я. Д. Захаров
1842	Закон сохранения энергии	Майер
1846	Открытие планеты Нептун	Галле
1852	Эффект Магнуса	Магнус
1881	Патент на самолет с паровым двигателем	Можайский
1881	Схема ракетоплана, предназначенного для полета человека	Кибальчич
1903	Управляемый самолет с двигателем внутреннего сгорания	Пирс
		братья Уилбур и Орвилл Райт
1903	Опубликована работа "Исследование мировых пространств реактивными приборами"	Циолковский
1905	Частная (специальная) теория относительности, закон эквивалентности массы и энергии	Эйнштейн
28.11.1905	На заседании Московского математического общества изложены основные положения работы "О присоединенных вихрях", которая сыграла важнейшую роль в развитии теории подъемной силы крыла самолета	Жуковский
25.07.1909	Перелет на самолете через Ла-Манш (37 минут)	Луи Блерио
1909	Проект турбореактивного двигателя	Герасимов
1910	Сделан доклад "О выборе конструкции научно обоснованного русского аэроплана" в Московском обществе воздухоплателей	Жуковский
1910	В Гатчине под Петербургом поднялся в воздух аэроплан, сооруженный по российскому проекту и из российских материалов	Гаккель, Булгаков
1910	В Воздухоплавательном парке на Волковом поле в Санкт-Петербурге впервые поднялся в воздух дирижабль "Кречет", ставший первым отечественным дирижаблем, принятым на вооружение	Россия
1914	Гидромеханизация при добыче торфа	Классон
1915	Общая теория относительности	Эйнштейн
1915	Цельнометаллический самолет	Юнкерс

Таблица П5 (окончание)

Дата	Событие	Автор(ы)
1928	Релятивистская теория движения электрона	Дирак
1929	Опубликована работа "Теория воздушного реактивного двигателя"	Стечкин
1930–1933	Первые жидкостно-реактивные двигатели	Цандер
1931	Испытания ракет	Винклер и Ридель
1938	Открытие сверхтекучести гелия	П. Л. Капица

Таблица П6. Важнейшие события в развитии космонавтики

Дата	Событие	Экипаж	Космический аппарат	Страна
1957	Первый в мире ИСЗ		ПС (Спутник-1)	СССР
1957	Первый в мире ИСЗ с живым существом	Собака Лайка	Спутник-2	СССР
1958	Первый американский ИСЗ		Explorer	США
1959	Искусственная планета Солнечной системы		Мечта (Луна-1)	СССР
1959	Искусственное тело на Луне		Луна-2	СССР
1959	Фотография невидимой (обратной) стороны Луны		Луна-3	СССР
1960	Суточный полет с возвращением на Землю	Собаки Белка и Стрелка	Восток	СССР
1961	Первый в мире орбитальный полет человека	Ю. А. Гагарин	Восток-1	СССР
1961	Второй в мире орбитальный полет человека	Г. С. Титов	Восток-2	СССР
1962	Первый американский орбитальный полет человека	Джон Гленн	Меркурий	США
1962	Первый в мире групповой полет двух космических кораблей	А. Г. Николаев, П. Р. Попович	Восток-3, Восток-4	СССР
1963	Первый в мире управляемый маневрирующий космический аппарат		Полет-1	СССР
1963	Первая в мире женщина в космосе	В. В. Терешкова	Восток-6	СССР
1964	Первый ИСЗ погодного наблюдения			СССР

Таблица П6 (окончание)

Дата	Событие	Экипаж	Космический аппарат	Страна
1964	Первый в мире полет экипажа	В. М. Комаров, К. П. Феоктистов, Б. Б. Егоров	Восход	СССР
1965	Первый в мире человек в открытом космосе	А. А. Леонов	Восход-2	СССР
1966	Мягкая посадка на Луну, панорамные снимки поверхности Луны		Луна-9	СССР
1966	Искусственное тело на Венере		Венера-3	СССР
1968	Пилотируемый полет вокруг Луны		Apollo 8	США
1969	Первые люди на поверхности Луны	Нил Армстронг и Эдвин Олдрин	Apollo 11	США
1970	Доставка проб грунта Луны на Землю		Луна-16	СССР
1970	Управляемый по радио самоходный аппарат (Луноход-1) на Луне		Луна-17	СССР
1970	Мягкая посадка на Венеру, непосредственное изучение атмосферы		Венера-7	СССР
1971	Мягкая посадка на Марс		Марс-3	СССР
1971	Пилотируемая орбитальная станция		Салют	СССР
1973	Космический аппарат, покинувший Солнечную систему, цветные снимки Юпитера		Пионер 10	США
1973	Первая долговременная орбитальная станция		Алмаз (Салют-2)	СССР
1974	Первый полет экипажа на долговременной орбитальной станции	П. Р. Попович, Ю. П. Артюхин	Алмаз-2 (Салют-3)	СССР
1981	Космический корабль многоразового использования на околоземной орбите		Columbia	США
1984	Первый в мире выход женщины в открытый космос	С. Е. Савицкая		СССР
1988	Первый беспилотный полет космического корабля многоразового использования		Буран/Энергия	СССР

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

# Краткие биографические справки

**Авогадро** Амедео (Avogadro Count Amadeo, di Quarenga, 1776—1856 гг.) — итальянский физик и химик, член Туринской Академии Наук (с 1819 г.). Родился в Турине. Окончил юридический факультет Туринского университета (1792 г.). С 1800 г. самостоятельно изучал математику и физику. Труды относятся к различным областям физики и химии. Заложил основы молекулярной теории (1811 г.). В 1811 г. выдвинул молекулярную гипотезу строения вещества. Открыл (1811 г.) закон, согласно которому в одинаковых объемах газов при одинаковых температурах и давлениях содержится одинаковое количество молекул (закон Авогадро). Именем Авогадро названа универсальная постоянная — число молекул в 1 моле идеального газа. Создал (1811 г.) метод определения молекулярной массы. Установил точный количественный атомный состав молекул многих веществ, а также (1814 г.) состав ряда соединений щелочных и щелочноземельных металлов, метана, этилового спирта, этилена.

**Адамс** Джон Кауч (Adams, J. C., 1819—1892 гг.) — английский астроном и математик, иностранный член-корреспондент Петербургской АН (с 1864 г.). В 1843—45 гг. на основании математического анализа неправильностей в движении планеты Уран предсказал существование планеты Нептун и вычислил ее массу и параметры орбиты.

**Амонтон** Гийом (Amontons, 1663—1705) — французский физик и геофизик, член Парижской АН (с 1699 г.). Сконструировал несколько оригинальных геофизических приборов — гигрометр (1687 г.), барометры, газовый термометр и др.; в 1695 г. издал сочинение о метеорологических инструментах. Пришел к понятию абсолютного нуля температуры. Связал упругость воздуха с давлением и температурой. Изучал тепловое расширение воздуха, ртути и других тел. Исследовал трение скольжения твердых тел и установил для него первые закономерности (1699 г.). Занимался также механикой движения живых организмов и измерением действующих при этом сил.

**Ампёр** Андре-Мари (Ampère, André Marie, 1775—1836 гг.) — французский физик, один из основоположников электродинамики. Предложил правило Ампера, в 1820 г. открыл механическое взаимодействие токов и установил закон Ампера; построил первую теорию магнетизма.

**Анаксагор** из Клазомен (Ἀναξαγόρας, около 500—428 гг. до н. э.) — древнегреческий философ; выдвинул учение о неразрушимых элементах — "семенах" вещей; движущий принцип мирового порядка — ум, организующий элементы.

**Ангстрём** Андрес Йонас (Ångström A.J., 1814—1874 гг.) — шведский физик и астроном, один из основоположников спектрального анализа.

**Аристотель** (Ἀριστοτέλης, 384—322 гг. до н. э.) — древнегреческий философ; учился у Платона; автор "Первой философии" (позднее названной метафизикой), содержащей учение об основных принципах бытия; колебался между материализмом и идеализмом.

**Архимед** (Ἀρχιμήδης, около 287—212 гг. до н. э.) — древнегреческий ученый, дал образцы применения математики и естествознания в технике.

**Березняк** Александр Яковлевич (1912—1974) — советский авиаконструктор. Участник создания БИ-1 — первого отечественного самолета с ЖРД (1942 г.). Под руководством Березняка разработан ряд образцов авиационной техники. Лауреат Ленинской (1962 г.) и Государственной премий СССР (1970 г.).

**Бернулли** Даниил (Bernoulli Daniel, 1700—1782 гг.) — швейцарский ученый, академик (1725-33 гг.) и иностранный почетный член (с 1733 г.) Петербургской АН. Разрабатывал законы механики жидких и газообразных тел. В работах, завершенных написанным в Петербурге трудом "Гидродинамика" (1738 г.), вывел основное уравнение стационарного движения идеальной жидкости, носящее его имя. Разрабатывал кинетические представления о газах.

**Бор** Нильс Хенрик Давид (Bohr Niels Henrik David, 1885—1962 гг.) — датский физик, создал теорию атома. Лауреат Нобелевской премии по физике (1922 г.).

**Браге** Тихо (Brahe Tycho, 1546—1601 гг.) — датский астроном (придворный математик и астроном Рудольфа II, императора Священной Римской империи), на основе его наблюдений Марса Кеплер вывел законы движения планет.

**Браун** Вернер фон (Braun Wernher von, 1912—1977 гг.) — немецкий конструктор ракет. Один из руководителей германского военного исследовательского ракетного центра в Пенемюнде (1937—1945 гг.), в котором была

создана ракета V2 (Фау-2). С 1945 г. в США, где под его руководством разработаны ракеты Redstone, Jupiter-C, ракеты-носители серии Saturn и др. В 1970—1972 гг. заместитель директора NASA.

**Брѳун** Роберт (Brown Robert, 1773—1858 гг.) — английский ботаник, в 1827 г. открыл броуновское движение.

**Буридан** Жан (Buridan Jean, около 1295—1358 гг.) — французский философ-схоласт, представитель номинализма, способствовал распространению во Франции ряда естественно-научных идей, ректор Парижского университета.

**Бэр** Карл Максимович (Карл Эрнст) (1792—1876 гг.) — российский естествоиспытатель, основатель эмбриологии, один из учредителей Русского географического общества, иностранный член-корреспондент (1826 г.), академик (1828—1830 и 1834—1862 гг.), почетный член (1862 г.) Петербургской АН. Родился в Эстляндии. Работал в Австрии и Германии; в 1829—1930 гг. и с 1834 г. в России. Редактор серии изданий по географии России. Объяснил закономерность подмыва берегов рек (закон Бэра).

**Вавилов** Сергей Иванович (1891—1951 гг.) — советский физик, основатель советской научной школы физической оптики; автор фундаментальных трудов по физической оптике, люминесценции и ее практическому применению; под руководством Вавилова открыто излучение Черенкова—Вавилова.

**Вайнберг** Стивен (Weinberg S., 1933 г.) — американский физик. Труды по физике элементарных частиц. Лауреат Нобелевской премии по физике (1979 г., совместно с Ш. Глэшоу и А. Саламом) за создание объединенной теории электромагнитного и слабого взаимодействий.

**Галилей** Галилео (Galilei Galileo, 1564—1642 гг.) — итальянский физик, механик и астроном, один из основателей точного естествознания. Боролся против схоластики, считал основой познания опыт. Заложил основы современной механики: выдвинул идею об относительности движения, установил законы инерции, свободного падения и движения тел по наклонной плоскости, сложения движений; открыл изохронность колебаний маятника; первым исследовал прочность балок. Построил телескоп с 32-кратным увеличением и открыл горы на Луне, 4 спутника Юпитера, фазы у Венеры, пятна на Солнце. Активно защищал гелиоцентрическую систему мира, за что был подвергнут суду инквизиции (1633 г.), вынудившей его отречься от учения Коперника. До конца жизни Галилей считался "узником инквизиции" и принужден был жить на своей вилле Арчетри близ Флоренции. В 1992 г. папа Иоанн Павел II объявил решение суда инквизиции ошибочным и реабилитировал Галилея.

- Галлэй (Халли)** Эдмунд (Halley, Edmund, 1656—1742 гг.) — английский астроном и геофизик, предсказал появление кометы Галлея.
- Гамильтон** Уильям Роуан (Sir William Rowan Hamilton, 1805—1865 гг.) — ирландский математик и астроном, иностранный член-корреспондент Петербургской АН (с 1837 г.). Дал точное формальное изложение теории комплексных чисел. Построил систему чисел — кватернионов. В механике дал общий принцип наименьшего действия.
- Гаусс** Карл Фридрих (Gauß Johann Karl Friedrich, 1777—1855 гг.) — немецкий ученый, автор трудов по алгебре, теории чисел, дифференциальной геометрии, математической физике, теории электричества и магнетизма, геодезии, астрономии. В 1820—1830 гг. Гаусс организовал измерение дуги меридиана Геттинген—Альтона. Изучение формы земной поверхности потребовало углубленного общего геометрического метода для исследования поверхностей. Выдвинутые Гауссом в этой области идеи получили выражение в сочинении "Общие изыскания о кривых поверхностях" (1827 г.). Гаусс предложил рассматривать те свойства поверхности, которые не зависят от изгибов поверхности, не изменяющих длин линий на ней. Вместе с Вебером Гаусс создал абсолютную систему электромагнитных единиц. Небольшое сочинение "О силах, действующих обратно пропорционально квадрату расстояния" (1834—1840 г.) содержит основы теории потенциала. В 1842—47 гг. создал основы высшей геодезии ("Исследования о предметах высшей геодезии").
- Гёккель** Эрнст (Haeckel Ernst, 1834—1919 гг.) — немецкий биолог-эволюционист, представитель естественно-научного материализма, сторонник и пропагандист учения Ч. Дарвина; сформулировал биогенетический закон.
- Гельмгольц** Герман Людвиг Фердинанд (Helmholtz Hermann Ludwig Ferdinand von, 1821—1894 гг.) — немецкий ученый, в 1847 г. впервые математически обосновал закон сохранения энергии, показав его всеобщий характер, разработал термодинамическую теорию химических процессов, ввел понятия свободной и связанной энергий.
- Герц** Генрих Рудольф (Hertz, Heinrich, 1857—1894 гг.) — немецкий физик, один из основоположников электродинамики; построил механику, свободную от понятия силы.
- Гершель** Уильям (Фридрих Вильгельм) (Herschel, 1738—1822 гг.) — английский астроном, в 1781 г. открыл Уран, в 1787 г. — его два спутника, в 1789 г. — два спутника Сатурна.
- Гильберт** Уильям (Gilbert William, 1544—1603 гг.) — английский физик, придворный врач королевы Елизаветы и один из крупнейших естествоиспытателей своей эпохи. Итогом его многолетних исследований явился

труд, опубликованный в Лондоне в 1600 г. под названием "О магните, магнитных телах и большом магните — Земле. Новая физиология, доказанная множеством аргументов и опытов". Гильберт впервые употребил слова: "электрика", "электрический", "электричество". Через 3 года после выхода своей книги Гильберт умер от чумы.

**Глушко** Валентин Петрович (1908—1989 гг.) — советский ученый в области физико-технических проблем энергетики, основоположник отечественного жидкостного ракетного двигателестроения, один из пионеров ракетной техники, академик АН СССР (с 1958 г.), Герой Социалистического Труда (1956 г., 1961 г.). Конструктор первого в мире электротермического ракетного двигателя (1929—33 гг.), первых ЖРД (1930—31 гг.). Под руководством Глушко созданы ЖРД, установленные на многих отечественных космических ракетах. Лауреат Ленинской (1957 г.) и Государственной премий СССР (1967 г., 1984 г.).

**Грин** Джордж (Green, G., 1793—1841) — английский математик. Самостоятельно изучал математику и лишь в 1837 г. окончил Кембриджский университет. В сочинении "Опыт применения математического анализа к теориям электричества и магнетизма" (1828 г.) ввел понятие "потенциала" и развил теорию электричества и магнетизма, опираясь на найденное им соотношение между интегралом по объему и интегралом по поверхности, ограничивающей объем. Эта работа оставалась неизвестной до ее переиздания в 1845 г. В 1839 г. выполнил важную работу об отражении и преломлении света в кристаллических средах, в которой также вывел основные уравнения теории упругости.

**Гук** Роберт (Hooke Robert, 1635—1703 гг.) — английский естествоиспытатель, в 1660 г. открыл закон, названный его именем.

**Гюйгенс** Христиан (Huygens Christiaan, 1629—1695 гг.) — голландский астроном, механик, математик и физик. В 1665—1681 гг. работал в Париже. В 1657 г. изобрел маятниковые часы со спусковым механизмом, дал их теорию, установил законы колебаний физического маятника, заложил основы теории удара. В 1678 г. создал (опубликовал в 1690 г.) волновую теорию света, объяснил двойное лучепреломление. Совместно с Р. Гуком установил постоянные точки термометра. Усовершенствовал телескоп; сконструировал окуляр, названный его именем. Открыл кольцо у Сатурна и его спутник Титан. Автор одного из первых трудов по теории вероятностей (1657 г.).

**Декарт** Рене (Descartes René, 1596—1650 гг.) — французский (голландский) философ, математик, физик и физиолог; заложил основы аналитической геометрии, дал понятия переменной величины и функции; высказал закон сохранения количества движения, дал понятие импульса силы.

- Демокрит** (около 470 г. или 460 г. до н. э.) — древнегреческий философ из г. Абдера (Фракия), один из основателей античной атомистики.
- Джбуль Джеймс Прескотт** (Joule James Prescott, 1818—1889 гг.) — английский физик, экспериментально обосновал закон сохранения энергии, определил механический эквивалент тепла, установил закон Джоуля—Ленца, открыл совместно с У. Томсоном эффект Джоуля—Томсона.
- Дирак Поль Адриен Морис** (Dirac Paul Adrien Maurice, 1902—1984 гг.) — английский физик, один из создателей квантовой механики, в 1928 г. разработал релятивистскую теорию движения электрона, предсказавшую позитрон, а также аннигиляцию и рождение частиц. Лауреат Нобелевской премии по физике (1933 г., совместно с Э. Шредингером).
- Жуковский Николай Егорович** (1847—1921 гг.) — русский ученый, основоположник современной аэродинамики; автор трудов по теории авиации, исследованию по механике твердого тела, астрономии, математике, гидродинамике и гидравлике, прикладной механике и др.
- Зенон** из Элеи (около 490—430 гг. до н. э.) — древнегреческий философ, представитель элейской школы; известен знаменитыми парадоксами (апо-риями) — "Ахиллес", "Стрела" и др., обосновывающими невозможность движения, множественности вещей и т. п.
- Иоффе Абрам Федорович** (1880—1960 гг.) — советский физик, один из создателей советской физической школы, пионер исследования полупроводников, организатор и первый директор Физико-технического института, Института полупроводников АН СССР и Физико-агрономического института, инициатор создания физико-технических институтов в Харькове, Днепропетровске, Свердловске, Томске.
- Исаев Алексей Михайлович** (1908—1971 гг.) — советский конструктор авиационных и ракетных двигателей, Герой Социалистического Труда (1956 г.). Участник создания БИ-1 — первого советского самолета с ЖРД (1942 г.). Под руководством Исаева разработана серия ЖРД для космических кораблей "Восток", "Восход", "Союз" и межпланетных космических аппаратов. Лауреат Сталинской (1948 г.), Ленинской (1958 г.) и Государственной премий СССР (1968 г.).
- Кавендиш Генри** (Cavendish Henry, 1731—1810 гг.) — английский физик и химик, член Лондонского королевского общества. С помощью изобретенных им крутильных весов подтвердил закон всемирного тяготения и определил массу Земли, установил закон взаимодействия электрических зарядов.
- Карно Никола́ Леонар Сади** (Carnot Nicolas Léonard Sadi, 1796—1832 гг.) — французский инженер-физик, один из основателей термодинамики; рассмотрел идеальный термодинамический цикл и доказал теорему Карно.

**Кассини** Джованни Доменико (Жан Доменик) (Cassini Jean Dominique, 1625—1712 гг.) французский астроном (итальянец по национальности), первый директор Парижской обсерватории, открыл вращение Юпитера и Марса и обнаружил 4 спутника Сатурна.

**Кеплер** Иоганн (Kepler Johannes, 1571—1630 гг.) — австрийский (немецкий) астроном и математик, открыл законы движения планет, заложил основы теории затмений.

**Клеро́** Алекси Клод (Clairaut, 1713—1765 гг.) — французский математик и астроном, автор трудов по теории движения Луны и фигуры Земли.

**Кибальчич** Николай Иванович (1853—1881 гг.) — русский ученый, народо-волец; 4 апреля 1881 г., находясь в заключении, разработал оригинальный проект реактивного летательного аппарата, предназначенного для полета человека.

**Коперник** Николай (Copernicus Nicolaus, 1473—1543 гг.) — польский астроном, создатель гелиоцентрической системы мира. Совершил переворот в естествознании, отказавшись от принятого в течение многих веков учения о центральном положении Земли. Объяснил видимые движения небесных светил вращением Земли вокруг оси и обращением планет (в том числе Земли) вокруг Солнца. Свое учение изложил в сочинении "Об обращениях небесных сфер" (1543 г.), запрещенном католической церковью с 1616 г. по 1828 г.

**Кориолис** Гюстав Гаспар (Coriolis G., 1792—1843 гг.) — французский ученый в области механики; автор трудов по теории относительности движения; ввел понятия силы Кориолиса и ускорения Кориолиса.

**Королев** Сергей Павлович (1907—1966 гг.) — советский академик, конструктор в области авиастроения, ракетостроения и космонавтики, дважды Герой Социалистического Труда. Необоснованно репрессирован в 1938—1944 гг.; находился в заключении на Колыме (1938—1940 гг.); затем работал в КБ в Москве (1940—1942 гг.) и Казани (1942—1944 гг.). Под руководством Королева созданы баллистические и геофизические ракеты, первые ИСЗ, спутники различного назначения ("Электрон", "Молния-1", "Космос", "Зонд" и др.), космические корабли "Восток", "Восход", на которых впервые в истории совершены космический полет человека и выход человека в космос. Лауреат Ленинской премии (1957 г.).

**Косберг** Семен Арневич (1903—1965 г.) — советский конструктор авиационных двигателей и двигателей для баллистических и космических ракет, д-р техн. наук, Герой Социалистического Труда (1961 г.). Под руководством Косберга создана серия ЖРД для последних ступеней ракет-носителей космических аппаратов. Лауреат Ленинской премии (1960 г.).

**Красовский** Феодосий Николаевич (1878—1948 гг.) — советский астроном-геодезист, член-корреспондент АН СССР (1939 г.). Под руководством Красовского определены размеры земного эллипсоида (эллипсоид Красовского). Лауреат Сталинских премий (1943 г., 1952 г. — посмертно).

**Кулон** Шарль Огюстен (Coulomb Charles Augustin de, 1736—1806 гг.) — французский инженер и физик, один из основателей электротехники; исследовал деформацию кручения нитей, установил ее законы; в 1784 г. изобрел крутильные весы, в 1785 г. открыл закон Кулона; установил законы сухого трения.

**Лавуазье** Антуан Лоран (Lavoisier, 1743—1794 гг.) — французский ученый-химик, в 1772—77 гг. выяснил роль кислорода в процессах горения, окисления и дыхания, в 1775 г. уточнил закон сохранения массы вещества, сформулированный М. В. Ломоносовым еще в 1748 г.

**Ламарк** Жан Батист Пьер Антуан де Моне (Lamarck, 1744—1829 гг.) — французский естествоиспытатель, создатель первой целостной эволюционной теории, член Парижской АН (с 1783 г.). В 1802 г. ввел термин "биология" одновременно с немецким ученым Г. Р. Тревиранусом и независимо от него. Помимо ботанических и зоологических работ, Ламарк — автор публикаций по геологии, гидрологии и метеорологии.

**Лангемак** Георгий Эрихович (1898—1938 гг.) — советский конструктор пороховых ракет, один из создателей реактивных снарядов для реактивного миномета "Катюша", Герой Социалистического Труда (посмертно).

**Лаплас** Пьер Симон (Laplace Pierre Simon, marquis de, 1749—1827 гг.) — французский астроном, математик, физик, философ, классический представитель механистического детерминизма. В 1780 г. Лаплас предложил новый способ вычисления орбит небесных тел. Исследования Лапласа доказали устойчивость Солнечной системы в течение очень длительного времени. Он пришел к заключению, что кольцо Сатурна не может быть сплошным и предсказал открытие сильного сжатия Сатурна у полюсов. В 1789 г. Лаплас рассмотрел теорию движения спутников Юпитера под действием взаимных возмущений и притяжения к Солнцу. Он получил полное согласие теории с наблюдениями и установил ряд законов этих движений. В 1787 г. Лаплас показал, что средняя скорость движения Луны зависит от эксцентриситета земной орбиты, а последний изменяется под действием притяжения планет. По неравенствам в движении Луны Лаплас определил величину сжатия Земли у полюсов. Ему принадлежит также разработка динамической теории приливов. Изучая ньютоновскую теорию тяготения, пришел к выводу, что вторая космическая скорость, т. е. скорость, необходимая для того, чтобы преодолеть гравитационное поле оп-

ределенного объекта (например, планеты или звезды), у особо массивных небесных тел должна превышать скорость света. Исходя из этого, Лаплас заключил, что такие тела должны быть невидимыми. Лапласовский детерминизм выражает идею абсолютного детерминизма — уверенность в том, что все происходящее имеет причину в человеческом понятии и есть непознанная разумом необходимость.

**Лауэ** Макс Феликс Теодор фон (Laue, M., 1879—1960 гг.) — немецкий физик. Ассистент М. Планка в институте теоретической физики (1905—09 гг.) и Мюнхенском университете. Под его руководством В. Фридрихом и П. Книппингом были получены первые лауэграммы и тем самым положено начало рентгеноструктурному анализу. Другие работы Лауэ посвящены теории относительности, сверхпроводимости, теории эффекта Комптона и т. д. Лауреат Нобелевской премии по физике (1914 г.).

**Леве́рье** Урбен Жан (1811—1877 гг.) — французский астроном, вычисливший существование планеты Нептун.

**Ленц** Эмилий Христианович (1804—1865 гг.) — российский физик и электротехник, с 1863 г. ректор Петербургского университета, в 1833 г. установил правило Ленца, в 1842 г. экспериментально обосновал закон Джоуля—Ленца, совместно с Б. С. Якоби дал методы расчета электромагнитов, открыл обратимость электрических машин, автор трудов по геофизике.

**Лифшиц** Евгений Михайлович (1915—85 гг.) — советский физик-теоретик, академик АН СССР (с 1979 г.). Основные труды по ферромагнетизму, межмолекулярным взаимодействиям, релятивистской космологии. Автор (совм. с Л. Д. Ландау) классического курса теоретической физики. Лауреат Государственной (1954 г.) и Ленинской (1962 г.) премий.

**Ломоно́сов** Михаил Васильевич (1711—1765 гг.) — русский ученый. В 19 лет ушел учиться (с 1731 г. в Славяно-греко-латинской академии в Москве, с 1735 г. в Академическом университете в Санкт-Петербурге, в 1736—1741 гг. в Германии). С 1742 г. адъюнкт, с 1745 г. академик Петербургской АН. В 1748 г. основал при АН первую в России химическую лабораторию. По инициативе Ломоносова в 1755 г. основан Московский университет. Исследования Ломоносова относятся к математике, физике, химии, наукам о Земле, астрономии, автор первой теории атмосферного электричества. В 1741—1750 гг. Ломоносов изложил основы своего атомно-корпускулярного учения; в 1744—1748 гг. выдвинул кинетическую теорию теплоты; в 1747—1752 гг. обосновал необходимость привлечения физики для объяснения химических явлений и предложил для теоретической части химии название "физическая химия", а для практической части — "техническая

химия"; в 1756 г. обратил внимание на основополагающее значение закона сохранения массы вещества в химических реакциях; в 1761 г. открыл атмосферу Венеры. В химической лаборатории Петербургской АН выполнялась широкая программа экспериментальных исследований. Ломоносов разработал точные методы взвешивания, применял объемные методы количественного анализа. Изучал жидкое, газообразное и твердое состояние тел. Достаточно точно определил коэффициенты расширения газов. Создал различные приборы (вискозиметр, прибор для фильтрования под вакуумом, прибор для определения твердости, газовый барометр, пирометр, котел для исследования веществ при низком и высоком давлении), достаточно точно градуировал термометры. Разработал технологию и рецептуру цветных стекол, которые он употреблял для создания мозаичных картин. Высказал идею биогенного происхождения гумуса почвы. Доказал органическое происхождение нефтей, каменного угля, торфа и янтаря. Первым из русских академиков приступил к подготовке учебников по химии и металлургии.

**Лóренц (Лóрентц)** Хендрик Антон (Lorentz, Hendrik Antoon, 1853—1928 гг.) — нидерландский физик, иностранный член-корреспондент Петербургской АН (с 1910 г.) и иностранный почетный член АН СССР (с 1925 г.). Труды по теоретической физике. Вывел преобразования, названные его именем. Близко подошел к созданию теории относительности. Лауреат Нобелевской премии по физике (1902 г., совм. с П. Зееманом).

**Лóуэлл Персиваль** (Lowell Percival, 1855—1916 гг.) — американский астроном, основал обсерваторию в Аризоне (the Lowell Observatory, Flagstaff, Arizona); его исследования привели к открытию Плутона в 1930 г.

**Люлька** Архип Михайлович (1908—1984 гг.) — советский конструктор авиационных двигателей, академик АН СССР (с 1968 г.), Герой Социалистического Труда (1957 г.). Под руководством Люльки создан первый советский турбореактивный двигатель (1947 г.). Лауреат Сталинских (1948 и 1951 гг.) и Ленинской премий (1976 г.).

**Мáгнус** Генрих Густав (Magnus, 1802—1870 гг.) — немецкий физик, иностранный член-корреспондент Петербургской АН (1854 г.). Автор трудов по механике, гидродинамике, теплоте и др. В 1852 г. открыл эффект, названный его именем. Глава научной школы. Основатель Берлинского физического общества, Немецкого химического общества.

**Мáйер** Роберт Юлиус (Mayer Julius Robert von, 1814—1878 гг.) — немецкий врач, во время плавания заметил, что в южных широтах венозная кровь ярче, чем на севере — это дало ему основание считать, что существует связь между потреблением вещества и образованием тепла, а теплота и

работа способны взаимопревращаться; одним из первых открыл закон сохранения и превращения энергии.

**Майкельсон** Альберт Абрахам (Michelson Albert Abraham, 1852—1931 гг.) — американский физик; автор точных оптических приборов (интерферометр Майкельсона, эшелон Майкельсона) и экспериментов по определению скорости света (опыт Майкельсона), спектральных измерений (в том числе длины метра в длинах волн красной спектральной линии кадмия и др. Лауреат Нобелевской премии по физике (1907 г.).

**Макеев** Виктор Петрович (1924—1985 гг.) — советский конструктор баллистических ракет, один из основоположников отечественной школы морского ракетостроения, академик АН СССР (с 1976 г.). Основные труды по летательным аппаратам. Дважды Герой Социалистического Труда (1961 и 1974 гг.), лауреат Ленинской (1959 г.) и Государственной премий СССР (1968 г.).

**Максвелл** Джеймс Клерк (Maxwell James Clerk, 1831—1979 гг.) — английский физик, создатель классической электродинамики, один из основоположников статистической физики, организатор и первый директор (с 1871 г.) Кавендишской лаборатории. Развивая идеи Майкла Фарадея, создал теорию электромагнитного поля (уравнения Максвелла); ввел понятие о токе смещения, предсказал существование электромагнитных волн, выдвинул идею электромагнитной природы света. Установил статистическое распределение, названное его именем. Исследовал вязкость, диффузию и теплопроводность газов. Показал, что кольца Сатурна состоят из отдельных тел. Автор трудов по цветному зрению и колориметрии (диск Максвелла), оптике (эффект Максвелла), теории упругости (теорема Максвелла, диаграмма Максвелла—Кремоны), термодинамике, истории физики и др. О роли Максвелла в развитии науки превосходно сказал американский физик Р. Фейнман: *"В истории человечества (если посмотреть на нее, скажем, через десять тысяч лет) самым значительным событием XIX столетия, несомненно, будет открытие Максвеллом законов электродинамики. На фоне этого важного научного открытия гражданская война в Америке в том же десятилетии будет выглядеть провинциальным происшествием"*.

**Мандельштам** Леонид Исаакович (1879—1944 гг.) — российский физик, один из основателей научной школы по радиофизике в СССР; в 1928 г. совместно с Г. С. Ландсбергом открыл комбинационное рассеяние света, совместно с Н. Д. Папалекси выполнил основополагающие исследования по нелинейным колебаниям, разработал метод параметрического возбуждения электрических колебаний, предложил радиоинтерференционный метод; автор трудов по рассеянию света.

**Мах Эрнст** (Mach Ernst, 1838—1916 гг.) — австрийский физик, открывший и исследовавший ударные волны.

**Менделеев Дмитрий Иванович** (1834—1907 гг.) — российский химик, в 1867—1890 гг. профессор Петербургского университета, открыл в марте 1869 г. периодический закон химических элементов; автор трудов по химии, неорганической химии, химической технологии, физике, метрологии, воздухоплаванию, метеорологии, сельскому хозяйству, экономике, народному просвещению и т. д. 19 октября 1875 г. выступил на заседании Петербургского физического общества с проектом первого в мире стратосферного аэростата с герметической кабиной. Организатор и первый директор (1883 г.) Главной палаты мер и весов.

**Мещёрский Иван Всеволодович** (1859—1935 гг.) — российский ученый в области теоретической и прикладной механики; автор трудов по механике тел переменной массы, ставших теоретической основой решения многих проблем реактивной техники.

**Минкóвский Герман** (Minkowski, 1864—1909 гг.) — немецкий математик и физик; автор трудов по геометрии, геометрическим методам в теории чисел, математической физике, гидродинамике; дал геометрическую интерпретацию кинематики специальной теории относительности (пространство Минковского).

**Можáйский Александр Федорович** (1825—1890 гг.) — российский исследователь, изобретатель летательных аппаратов, контр-адмирал (с 1886 г.). Получил в 1881 г. привилегию на изобретенный им "воздухоплавательный снаряд" (самолет) — первый в России патент на летательный аппарат, который был построен в натуральную величину в 1883 г. Попытка поднять самолет в воздух была предпринята в 1885 г.

**Мóос Фридрих** (Mohs Friedrich, 1773—1839 гг.) — немецкий минералог, в 1811 г. предложил минералогическую шкалу твердости.

**Ньюто́н Исаак** (Newton Sir Isaac, 1643—1727 гг.) — английский математик, механик, астроном и физик, создатель классической механики, член (с 1672 г.) и президент (с 1703 г.) Лондонского королевского общества. В 1664—1667 гг., когда в Лондоне свирепствовала чума, Ньютон сделал 3 важнейших открытия: дифференциальное и интегральное исчисления, объяснение природы света, закон всемирного тяготения, описанные в фундаментальных трудах "Математические начала натуральной философии" (1687 г.) и "Оптика" (1704 г.). В механике Ньютон продолжил труды Галилея и Кеплера. Он сформулировал основные законы классической механики. Открыл закон всемирного тяготения, дал теорию движения небесных тел, создав основы небесной механики. Пространство и время считал абсолютными. В работе "Оптика" обосновал законы отражения и прелом-

ления света на основе корпускулярной теории, исследовал интерференцию и дифракцию. В опытах с призмой открыл дисперсию света и разложил белый свет в спектр. Построил первый зеркальный телескоп. Был директором Монетного двора, наладил монетное дело в Англии. В 1703 г. Ньютон стал президентом Лондонского Королевского общества. Работы Ньютона на несколько столетий стали фундаментом для физики и техники. Некоторые открытия Ньютона оспаривались его современниками (в том числе Гуком и Лейбницем). Ньютон был торжественно похоронен в Вестминстерском аббатстве. Над его могилой высится памятник с бюстом и эпитафией *"Здесь покоится сэр Исаак Ньютон, дворянин, который почти божественным разумом первый доказал с факелом математики движение планет, пути комет и приливы океанов. Он исследовал различие световых лучей и проявляющиеся при этом различные свойства цветов... Пусть смертные радуются, что существует такое украшение рода человеческого"*.

**Оппенгэймер** Роберт (Oppenheimer Robert, 1904—1967 гг.) — американский физик, в 1943—1945 гг. руководил созданием американской атомной бомбы.

**Остроградский** Михаил Васильевич (1801—1862 гг.) — русский математик и механик. Труды по математическому анализу, математической физике, аналитической и небесной механике, гидромеханике, теории упругости, баллистике. Нашел формулу преобразования интеграла по объему в интеграл по поверхности (формула Остроградского).

**Паскаль** Блез (Pascal Blaise, 1623—1662 гг.) — французский математик и физик; один из основоположников гидростатики, установил ее основной закон — закон Паскаля; автор работы по теории воздушного давления.

**Перрэн** Жан Батист (Perrin Jean, 1870—1942 гг.) — французский (американский) физик. Иностраннный член-корреспондент РАН (1924 г.) и иностранный почетный член (1929 г.) АН СССР. С 1940 г. в США. Труды по различным вопросам физики. Доказал (1895 г.), что катодные лучи являются потоком отрицательно заряженных частиц. Экспериментально исследовал броуновское движение (1908—1913 гг.), подтвердив теорию Эйнштейна—Смолуховского и окончательно доказав реальность существования молекул. Труды по исследованию тонких пленок, рентгеновского излучения, радиоактивности и др. Лауреат Нобелевской премии по физике (1926 г.).

**Петропáвловский** Борис Сергеевич (1898—1933 гг.) — советский конструктор пороховых ракет, Герой Социалистического Труда (1991 г., посмертно). Начальник газодинамической лаборатории (1930—1931 гг.). Участвовал в создании реактивных снарядов для "Катюши".

**Пика́р** Жан (Picard, 1620—1682 гг.) — французский астроном. В 1669—1670 гг. измерил дугу меридиана между Парижем и Амьеном. Пришел к

выводу, что Земля не имеет точной формы шара. В 1679 г. издал первый астрономический ежегодник.

**Платон** (428 или 427 до н. э.—348 или 347 до н. э.) — древнегреческий философ. Ученик Сократа, около 387 г. до н. э. основал в Афинах школу.

**Плиний Старший**, Гай Плиний Секунд (Gaius Plinius Secundus (также Maior), 23 или 24—79 гг.) — римский писатель, ученый и государственный деятель. Автор "Естественной истории" в 37 книгах — своеобразной энциклопедии естественно-научных знаний античности. Содержит сведения по астрономии, физической географии, метеорологии, этнографии, антропологии, зоологии, ботанике, сельскому и лесному хозяйству, медицине, минералогии, металлургии и пр., перемешанные с фантастическими рассказами, небылицами, суевериями, анекдотами. Список книг, составленный Плинием, свидетельствует, что он изучил более 2000 сочинений по астрономии, минералогии, физике, ботанике, медицине, этнографии, технике, анатомии и т. п. В "Естественной истории" каждой из этих наук посвящено несколько книг. До конца XVII в. "Естественная история" использовалась как источник знаний о природе.

**Прандтль** Людвиг (Prandtl, 1875—1953 гг.) — немецкий ученый, один из основателей аэродинамики, создатель научной школы по прикладной гидроаэромеханике; ввел представление о пограничном слое и отрывном течении; проводил фундаментальные исследования турбулентности, сверхзвукового истечения, теплопередачи в потоке.

**Пуазейль** Жан Луи Мари (Poiseuille Jean, 1799—1869 гг.) — французский врач и физик. Автор трудов по физиологии дыхания, динамике кровообращения. Первым в 1828 г. применил ртутный манометр для измерения кровяного давления животных. Экспериментально установил закономерности продвижения жидкости в тонких трубках (закон Пуазейля).

**Пуанкаре** Жюль Анри (Poincaré Jules Henri, 1854—1912 гг.) — французский математик, физик и философ; автор трудов по дифференциальным уравнениям, теории аналитических функций, небесной механике, математической физике; в 1905—1906 гг. независимо от Эйнштейна развил математические следствия "постулата относительности".

**Пуассон** Симеон Дени (Poisson Siméon Denis, 1781—1840 гг.) — французский математик, механик и физик, иностранный почетный член Петербургской АН (1826 г.). Автор трудов по математическому анализу, теории вероятностей, математической физике, теоретической и небесной механике, теории упругости, гидродинамике и др.

**Райт** Орвилл (Wright, Orville, 1871—1948 гг.) — американский авиаконструктор и летчик, пионер авиации. Вместе с братом первым в мире

17.12.1903 совершил полет продолжительностью 59 с на самолете собственной конструкции с двигателем внутреннего сгорания.

**Райт** Уилбер (Wright, Wilbur, 1867—1912 гг.) — американский авиаконструктор и летчик, пионер авиации. Вместе с братом первым в мире 17.12.1903 совершил полет продолжительностью 59 с на самолете собственной конструкции с двигателем внутреннего сгорания.

**Ранкин** (Ренкин) Уильям Джон Макуорн (Rankine W., 1820—1872 гг.) — английский (шотландский) инженер и физик, один из создателей технической термодинамики. В 1852 г. ввел в научный обиход термин "энергия". Предложил теоретический цикл парового двигателя (цикл Ранкина), температурную шкалу (шкала Ранкина).

**Резерфорд** Эрнст (Rutherford Ernest, Baron, 1871—1937 гг.) — английский физик, один из создателей учения о радиоактивности и строении атома, в 1899 г. открыл альфа- и бета-лучи и установил их природу, в 1903 г. создал теорию радиоактивности, в 1911 г. предложил планетарную модель атома, в 1919 г. осуществил первую искусственную ядерную реакцию, в 1921 г. предсказал существование нейтрона. Лауреат Нобелевской премии по химии за исследования по превращению элементов (1908 г.).

**Рейнольдс** Осборн (Reynolds Osborne, 1842—1912 гг.) — английский физик и инженер, основные труды по теории динамического подобия, течению вязкой жидкости, теориям турбулентности и смазки.

**Ремер** Оле Кристенсен (Romer, 1644—1710 гг.) — датский астроном. Профессор Копенгагенского университета (с 1681 г.). В 1675 г. по наблюдениям затмений спутников Юпитера определил скорость распространения света. Изобрел несколько астрономических инструментов: меридианный круг, экваториал с часовым кругом и кругом склонений и др. Пользуясь ими, определил склонения и прямые восхождения более 1000 звезд.

**Сала́м** Абдус (Salam A., 1926 г.) — пакистанский физик-теоретик, с 1971 г. ин. член АН СССР. С 1964 г. директор Международного центра теоретической физики в Триесте. Труды по квантовой теории поля и элементарных частиц, теории гравитации. Один из авторов объединенной теории электромагнитного и слабого взаимодействий (Теория Вайнберга—Салама). Лауреат Нобелевской премии по физике (1979 г., совместно с Ш. Глэшоу и С. Вайнбергом). Золотая медаль им. Ломоносова АН СССР (1984 г.).

**Свэдберг** Теодор (Svedberg Theodore, 1884—1971 гг.) — шведский физико-химик, в 1906 г. экспериментально подтвердил теорию броуновского движения Эйнштейна и Смолуховского, в 1919—1923 гг. создал ультрацентрифугу и в 1925 г. применил ее для определения молекулярной массы белков. Лауреат Нобелевской премии по химии (1926 г.).

**Скиапарелли** Джованни Вирджинио (Schiaparelli Giovanni Virginio, 1835—1910 гг.) — итальянский астроном, в 1877 г. обнаружил на Марсе сеть тонких линий ("каналов").

**Стокс** Джордж Габриель (Stokes Sir George, 1819—1903 гг.) — английский физик и математик, член (1851 г.) и президент (1885—1890 гг.) Лондонского Королевского общества. Проводил фундаментальные исследования по гидродинамике (уравнение Навье—Стокса, закон Стокса). Автор трудов по оптике, спектроскопии и люминесценции (правило Стокса), гравиметрии, векторному анализу (формула Стокса), рентгеновскому излучению.

**Торричелли** Эванджелиста (Torricelli, 1608—1647 гг.) — итальянский физик и математик. Ученик Г. Галилея. Изобрел ртутный барометр, открыл существование атмосферного давления и вакуума (торричеллиева пустота). Вывел формулу, названную его именем.

**Туполев** Андрей Николаевич (1888—1972 гг.) — русский авиаконструктор, академик АН СССР (с 1953 г.), генерал-полковник-инженер (с 1968 г.), трижды Герой Социалистического Труда (1945, 1957 и 1972 гг.). В 1937—1941 гг. был репрессирован. Под руководством Туполева создано свыше 100 типов военных и гражданских самолетов, в том числе АНТ-25, Ту-104, Ту-114, Ту-134, Ту-154. На самолетах Туполева установлено 78 мировых рекордов, выполнено 28 уникальных перелетов, в том числе В. П. Чкалова и М. М. Громова на АНТ-25 через Северный полюс в США. Лауреат Сталинских (1943, 1948, 1949 и 1952 гг.), Ленинской (1957 г.) и Государственной премий СССР (1972 г.).

**Уатт** Джеймс (Watt James, 1736—1819 гг.) — английский изобретатель, создатель универсального теплового двигателя; в 1774—1784 гг. изобрел паровую машину с цилиндром двойного действия, в которой применил центробежный регулятор, передачу от штока цилиндра к балансиру с параллелограммом и др.

**Фейнман** Ричард Филлипс (Feynman Richard P., 1918—1988 гг.) — американский физик-теоретик, реформатор методов преподавания физики в вузе. Лауреат Нобелевской премии по физике (1965 г.).

**Федоров** Евгений Константинович (1910—1981 гг.) — русский геофизик, академик АН СССР (с 1960 г.), Герой Советского Союза (1938 г.). В 1937—1938 гг. научный сотрудник первой дрейфующей станции "Северный полюс-1". С 1956 г. первый директор (до 1969 г.) Института прикладной геофизики (ныне носит его имя). Начальник Главного управления гидрометеослужбы при СНК, СМ СССР (1939—1947, 1962—1974 гг.). Труды по прикладной геофизике, охране окружающей среды. Лауреат Сталинской (1946 г.) и Государственной премий СССР (1969 г.).

**Физо́** Арман Ипполит Луи (Fizeau, Armand Hippolyte Louis, 1819—1896 гг.) — французский физик; первым в 1849 г. измерил скорость света земного источника; в 1851 г. определил скорость света в движущейся жидкости и показал, что свет частично увлекается движущейся средой (опыт Физо).

**Фицджеральд** Джордж (FitzGerald George, 1851—1901 гг.) — ирландский физик.

**Фок** Владимир Александрович (1898—1974 гг.) — советский физик-теоретик, академик АН СССР (с 1939 г.), Герой Социалистического Труда (1968 г.). В 1932 г. Фок был избран членом-корреспондентом АН СССР и стал профессором Ленинградского университета. Фок организовал кафедру теоретической физики и квантовой механики, читал курсы квантовой механики и теории относительности, выступал с лекциями и докладами по принципиальным вопросам теоретической физики. Автор фундаментальных трудов по квантовой механике и электродинамике, общей теории относительности. Проводил исследования по распространению радиоволн, математике, математической физике, философским вопросам физики. Лауреат Сталинской (1946 г.) и Ленинской премий (1960 г.).

**Фраунгофер** Йозеф (Fraunhofer Joseph von, 1787—1826 гг.) — немецкий физик-самоучка, в 1814 г. подробно исследовал и описал все темные полосы в солнечном спектре, дал им свои названия и с успехом использовал их в своей работе — изготовлении линз, которые он проверял по эталону — спектру Солнца.

**Фрэнкель** Яков Ильич (1894—1952 гг.) — российский физик-теоретик, выпускник физико-математического факультета Петербургского университета; ввел понятия экситона и дефектов в кристаллах; автор трудов по электронной теории металлов, ферромагнетизму, кинетической теории жидкости, ядерной физике, электродинамике, физике твердого тела.

**Фуко́** Жан-Бернар Леон (Foucault, Jean Bernard Léon, 1819—1868 гг.) — французский физик, иностранный член-корреспондент Петербургской АН (с 1860 г.). В 1850 г. определил скорость света в воздухе и воде методом, позднее названным его именем. В 1851 г. осуществил опыт с маятником (маятником Фуко), подтвердивший суточное вращение Земли. Обнаружил электрические вихревые токи (токи Фуко). Изобрел гироскоп.

**Хаббл** Эдвин Пауэлл (Hubble Edwin Powell, 1889—1953 гг.) — американский астроном; доказал звездную природу внегалактических туманностей (галактик); оценил расстояние до некоторых из них, разработал основы их структурной классификации; в 1929 г. установил закономерность разлета галактик.

**Хартри** Дуглас (Hartree Douglas, 1897—1958 гг.) — английский физик-теоретик. В 1928 г. предложил систему единиц Хартри.

**Холл Асаф** (Эсаф) (Hall Asaph, 1829—1907 гг.) — американский астроном, в 1876 г. определил период вращения Сатурна, в 1877 г. открыл спутники Марса.

**Цандер Фридрих Артурович** (1887—1933 гг.) — советский конструктор первых реактивных двигателей. Создал реактивные двигатели ОР-1 и ОР-2. Разрабатывал проект ракеты "ГИРД-Х".

**Цеппелин Фердинанд** (Zeppelin, 1838—1917 гг.) — немецкий конструктор дирижаблей, граф, генерал. Организатор производства (с 1900 г.) и серийного выпуска дирижаблей жесткой конструкции "цеппелин".

**Циолковский Константин Эдуардович** (1857—1935 гг.) — российский ученый и изобретатель в области аэро- и ракетодинамики, теории самолета и дирижабля; основоположник современной космонавтики; впервые обосновал возможность использования ракет для межпланетных сообщений, указал рациональные пути развития космонавтики и ракетостроения, нашел ряд важных инженерных решений конструкции ракет и реактивных двигателей, сконструировал цельнометаллический дирижабль.

**Чаплыгин Сергей Алексеевич** (1869—1942 гг.) — русский механик, один из основоположников гидро- и аэродинамики, академик АН СССР (с 1929 г.), Герой Социалистического Труда (1941 г.). Труды по теоретической механике, гидро-, аэро- и газовой динамике. Совместно с Н. Е. Жуковским участвовал в организации ЦАГИ (1918 г., в 1921—1941 гг. научный руководитель).

**Челомей Владимир** (1914—1984 гг.) — советский ученый в области механики и процессов управления, академик АН СССР (с 1962 г.), Герой Социалистического Труда (1959, 1963 гг.). Руководил разработкой ракеты-носителя и ИСЗ "Протон", ИСЗ "Полет", орбитальных станций типа "Алмаз" и "Салют". Автор трудов по теории колебаний, устойчивости упругих систем, динамике машин и др. Лауреат Ленинской (1959 г.) и Государственной премий (1967, 1974, 1982 гг.).

**Шварцшильд Карл** (Schwarzschild, 1873—1916 гг.) — немецкий астроном; создал теорию лучистого равновесия и применил ее к атмосферам звезд; впервые получил точное решение уравнений теории относительности Эйнштейна.

**Эдисон Томас Алва** (Edison, Thomas Alva, 1847—1931 гг.) — американский изобретатель и предприниматель, организатор и руководитель первой американской промышленной исследовательской лаборатории (1872 г., Менло-Парк), иностранный почетный член АН СССР (с 1930 г.). Автор свыше 1000 изобретений, главным образом в различных областях электротехники. Изобрел фонограф (1877 г.), усовершенствовал телеграф и телефон, лампу накаливания (1879 г.) и др., построил первую в мире электро-

станцию общественного пользования (1882 г.), обнаружил явление термоионной эмиссии (1883 г.) и др.

**Эйлер**, Леонард (Euler, 1707—83 гг.) — математик, механик, физик и астроном. По происхождению швейцарец. В 1726 г. был приглашен в Петербургскую АН и переехал в 1727 г. в Россию. Был адъюнктом (с 1726 г.), а в 1731—41 гг. и с 1766 г. академиком Петербургской АН (в 1742—66 гг. — иностранный почетный член). В 1741—66 гг. работал в Берлине, член Берлинской АН. Автор свыше 800 работ по математическому анализу, дифференциальной геометрии, теории чисел, приближенным вычислениям, небесной механике, математической физике, оптике, баллистике, кораблестроению, теории музыки и др., оказавших значительное влияние на развитие науки.

**Эйнштейн** Альберт (Einstein Albert, 1879—1955 гг.) — выдающийся физик, создатель теории относительности, один из создателей квантовой теории и статистической физики. Родился в Германии, в городе Ульме. С 14-ти лет вместе с семьей жил в Швейцарии, где в 1900 г. окончил Цюрихский политехникум. В 1902—1909 гг. служил экспертом патентного бюро в Берне. В эти годы Эйнштейн создал специальную теорию относительности, выполнил исследования по статистической физике, броуновскому движению, теории излучения и др. Работы Эйнштейна получили известность, и в 1909 г. он был избран профессором Цюрихского университета, а затем — Немецкого университета в Праге. В 1914 г. Эйнштейн был приглашен преподавать в Берлинский университет. В период своей жизни в Берлине он завершил создание общей теории относительности, развил квантовую теорию излучения. За открытие законов фотоэффекта и работы в области теоретической физики Эйнштейн получил в 1921 г. Нобелевскую премию по физике. В 1933 г. после прихода к власти в Германии фашистов Эйнштейн эмигрировал в США, в Принстон, где он до конца жизни работал в Институте высших исследований. В 1905 г. была опубликована специальная теория относительности — механика и электродинамика тел, движущихся со скоростями, близкими к скорости света. В 1905 г. ввел понятие фотона, установил законы фотоэффекта, основной закон фотохимии, тогда же Эйнштейн открыл закон взаимосвязи массы и энергии ( $E = mc^2$ ), в 1907—1916 гг. — создал общую теорию относительности, в 1917 г. предсказал индуцированное излучение, развил статистическую теорию броуновского движения, заложив основы теории флуктуаций, создал квантовую статистику Бозе—Эйнштейна, с 1933 г. работал над проблемами космологии и единой теории поля. Эйнштейн был членом многих академий мира и научных обществ. В 1926 г. его избрали почетным членом Академии наук СССР.

**Эйфель** Александр Гюстав (Eiffel, 1832—1923 гг.) — французский инженер-строитель. Строитель мостов, виадуков, Эйфелевой башни в Париже (1889 г.).

**Эпику́р** (341—270 гг. до н. э.) — древнегреческий философ-материалист, делил философию на физику (учение о природе), канонику (учение о познании) и этику, в физике следовал атомистике Демокрита.

**Эратосфён** Киренский (около 276—194 гг. до н. э.) — древнегреческий ученый. Заложил основы математической географии, впервые измерил дугу меридиана. Автор трудов по математике (теория чисел), астрономии, филологии, философии, музыке. Сохранились лишь отрывки.

**Этвеш** Лоранд (Роланд) фон (Eötvös, 1848—1919 гг.) — венгерский физик, изобрел гравитационный вариометр, в 1890—1906 гг. экспериментально установил равенство гравитационной и инерционной масс.

**Юнг (Янг)** Томас (Young Thomas, 1773—1829 гг.) — английский физик, врач и астроном, один из основоположников волновой теории света, в 1801 г. сформулировал принцип интерференции, в 1817 г. высказал идею о поперечности световых волн, ввел характеристику упругости (модуль Юнга).

# Литература

1. Альфа и омега: Краткий справочник. — Таллин: Валгус, 1988.
2. Анциферов Л. И. Физика: Механика, термодинамика и молекулярная физика. — М.: Мнемозина, 2001.
3. Аглонов С. В. Геодинамика. — СПб.: Изд-во СПбГУ, 2001.
4. Булкин П. С., Попова И. И. Общий физический практикум. Молекулярная физика. — М.: Изд-во МГУ, 1988.
5. Вольский А. П. Космодром. — М.: Воениздат, 1977.
6. Вороницкая Л. В., Васковская В. Н. Физика. — Киев: Издательское объединение "Вища школа" при Киевском государственном университете, 1974.
7. Геворкян Р. Г., Шепель В. В. Курс общей физики. — М.: Высшая школа, 1972.
8. Грибов Л. А., Прокофьева Н. И. Основы физики. — М.: Наука, 1995.
9. Гурский И. П. Элементарная физика с примерами решения задач. — М.: Наука: 1976.
10. Детлаф А. А., Яворский Б. М. Курс физики. — М.: Высшая школа, 1989.
11. Джанколи Д. Физика. — М.: Мир, 1989.
12. Жданов Л. С., Жданов Г. Л. Физика для средних специальных учебных заведений. — М.: Наука, 1987.
13. Зисман Г. А., Годес О. М. Курс общей физики. — М.: Наука, 1972.
14. Ишлинский А. Ю. Политехнический словарь. — М.: Советская энциклопедия, 1989.
15. Ишлинский А. Ю. Механика. Идеи, задачи, приложения. — М.: Наука, 1985.

16. Каленков С. Г., Соломахо Г. И. Практикум по физике. Механика. — М.: Высшая школа, 1990.
17. Карпенков С. Х. Основные концепции естествознания. — М.: ЮНИТИ, 1998.
18. Кикин Д. Г. Физика (с основами астрономии). — М.: Высшая школа, 1995.
19. Кириллин В. А. Страницы истории науки и техники. — М.: Наука, 1986.
20. Кирьянов А. П., Коршунов С. М. Термодинамика и молекулярная физика. — М.: Просвещение, 1977.
21. Комиссаров В. Н. Уроки физики в профтехучилищах. — М.: Высшая школа, 1990.
22. Кошкин Н. И., Ширкевич М. Г. Справочник по элементарной физике. — М.: Наука, 1974.
23. Ландау Л. Д., Ахиезер А. И., Лифшиц Е. М. Курс общей физики. Механика и молекулярная физика. — М.: Наука, 1965.
24. Ландау Л. Д., Китайгородский А. И. Физика для всех. — М.: Наука, 1978.
25. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика. — М.: Наука, 1973.
26. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Том 5. Теория упругости. — М.: Наука, 1964.
27. Льюэци М. История физики. — М.: Мир, 1970.
28. Матвеев А. Н. Механика и теория относительности. — М.: Высшая школа, 1986.
29. Мерион Дж. Б. Общая физика с биологическими примерами. — М.: Высшая школа, 1986.
30. Милковская Л. Б. Повторим физику. — М.: Высшая школа, 1977.
31. Мустафаев Р. А., Кривцов В. Г. Физика. В помощь поступающим в вузы. — М.: Высшая школа, 1989.
32. Орир Дж. Физика. Том 1. — М.: Мир, 1981.
33. Павленко Ю. Г. Начала физики. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988.
34. Павленко Ю. Г. Начала физики. — М.: Изд-во "Экзамен", 2005.
35. Павленко Ю. Г. Физика. — М.: Джангар. Большая медведица, 1998, 2001—2002.
36. Павленко Ю. Г. Физика. — М.: Новая волна, 2002.
37. Перельман Я. И. Занимательная механика. Знаете ли вы физику? — М.: АСТ, 1999.

38. Пинский А. А., Граковский Г. Ю. Физика. — М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2004.
39. Поль Р. В. Механика, акустика и учение о теплоте. — М.: Наука, 1971.
40. Поройков И. В. Краткий курс лекций по физике. — М.: Высшая школа, 1965.
41. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой. — М.: Эдиториал УРСС, 2001.
42. Прохоров А. М. Большой энциклопедический словарь. — М.: Сов. энциклопедия, 1993.
43. Прохоров А. М. Физическая энциклопедия. — М.: Большая Российская энциклопедия, 1988—1998.
44. Ремизов А. Н. Медицинская и биологическая физика. — М.: Высшая школа, 1999.
45. Роуэлл Г., Герберт С. Физика. — М.: Просвещение, 1994.
46. Савельев И. В. Курс общей физики. — М.: Наука, 1987.
47. Сивухин Д. В. Общий курс физики. — М.: Наука, 1990.
48. Степанова Г. Н. Физика. — СПб.: ООО "СТП-Школа", 2002.
49. Стрелков С. П. Механика. — М.: Наука, 1975.
50. Трофимова Т. И. Курс физики. — М.: Высшая школа, 1999.
51. Трофимова Т. И. Справочник по физике для студентов и абитуриентов. — М.: ООО "Издательство Астрель": ООО "Издательство АСТ", 2001.
52. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. — М.: Мир, 1976.
53. Фриш С. Э., Тиморева А. В. Курс общей физики. — М.: Гос. изд. физ.-мат. литер., 1961.
54. Холмогоров В. Е., Захарова Э. Н. Классическая механика. — СПб.: Изд-во СПбГУ, 1991.
55. Храмов Ю. А. Физики. Библиографический справочник. — М.: Наука, 1983.
56. Чулановская М. В. Курс физики для биологов. Часть I. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1972.
57. Шебалин О. Д. Физические основы механики и акустики. — М.: Высшая школа, 1981.
58. Эллиот Л., Уилкоккс У. Физика. — М.: Наука, 1975.

59. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике. — М.: Наука, 1963, 1980.
60. Bureau International des Poids et Mesures, Le Système International d'Unités (SI), 5<sup>th</sup> French and English Edition, Sevres, BIPM, 1985.
61. Cohen E.R. and Taylor B.N. The 1986 Adjustment of the Fundamental Physical Constants — CODATA Bull, 1986, v. 63, p. 1—49.
62. Internationally Adopted Values. — Успехи физических наук, т. 173, № 3, 2003.
63. Weisskopf V.F. Просто о сложном: высота гор, образование волн на поверхности воды. — М.: Физика за рубежом. Серия Б, 1988.

# Дополнительная литература

## Введение

- 📖 Бармасова А. М., Бармасов А. В., Скобликова А. Л., Холмогоров В. Е., Яковлева Т. Ю. Особенности преподавания общей физики студентам-экологам / В сб. "10 лет факультету экологии и физики природной среды РГГМУ". — СПб.: РГГМУ, 2005.
- 📖 Бармасова А. М., Бармасов А. В., Бобровский А. П., Яковлева Т. Ю. К вопросу об особенностях преподавания общей физики студентам-экологам / В сб. "Тезисы докладов. Совещание заведующих кафедрами физики технических ВУЗов России". — М.: АВИАИЗДАТ, 2006.
- 📖 Бармасова А. М., Яковлева Т. Ю., Бармасов А. В., Бобровский А. П., Букина М. Н., Холмогоров В. Е. Комплексный подход к преподаванию физики студентам-природопользователям / В кн.: Тезисы докладов научно-методической школы-семинара по проблеме "Физика в системе инженерного образования стран ЕврАзЭС" и совещания заведующих кафедрами физики технических ВУЗов России. 25—27 июня 2007 г., г. Москва / Под ред. проф. Г. Г. Спирина. — М.: ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2007. — 344 с. — С. 40—41.

## Литература к Главе 1

- 📖 Бурдун Г. Д., Тюрин Н. И. Си — новая международная система единиц / В сб.: Физика: близкое и далекое. Сост. В. Н. Тростников. — М.: Знание, 1963. — С. 485—499.
- 📖 Веселовский И. Н. Очерки по истории теоретической механики. — М.: Высшая школа, 1974.

- ☞ *Виргинский В. С.* Очерки истории науки и техники XVI—XIX веков. — М.: Просвещение, 1984.
- ☞ *Гершензон Е. М., Малов Н. Н.* Курс общей физики: Механика: Учеб. пособие для студентов физ.-мат. фак. пед. ин-тов. — 2-е изд., перераб. — М.: Просвещение, 1987, §§ 1.1, 2.4.
- ☞ *Зисман Г. А., Тодес О. М.* Курс общей физики. Том I. Механика, молекулярная физика, колебания и волны. — Изд. 5-е. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1972, § 1.
- ☞ *Зубов В. П.* История механики с древнейших времен до конца XVII в. — М.: Наука, 1971.
- ☞ *Лантнев Г. Ф.* Элементы векторного исчисления. — М.: Наука, 1975.
- ☞ *Павленко Ю. Г.* Начала физики: Учебник. — 2-е изд. перераб. и доп. — М.: Издательство "Экзамен", 2005, § 1.1.1.
- ☞ *Савельев И. В.* Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х т. Том 1. Механика. Молекулярная физика. — 3-е изд., испр. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987, §§ 1, 2, 6, 10.
- ☞ *Сена Л. А.* Единицы физических величин и их размерности: Учебно-справочное руководство. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988.
- ☞ *Стрелков С. П.* Механика. — Изд. 3-е, перераб. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1975, Введение, §§ 1, 7, 43.
- ☞ *Трофимова Т. И.* Курс физики: Учеб. пособие для вузов. — 6-е изд., стер. — М.: Высшая школа, 1999, § 1.
- ☞ *Фейнман Р.* Характер физических законов. — М.: Мир, 1968.
- ☞ *Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.* Фейнмановские лекции по физике. 1. Современная наука о природе. Законы механики. — М.: Мир, 1965, §§ 2.1, 2.2, 11.4, 11.5, 11.7.
- ☞ *Чертов А. Г.* Физические величины (терминология, определения, обозначения, размерности, единицы): Справ. пособие. — М.: Высшая школа, 1990.

## Литература к Главе 2

- ☞ *Болотникова Я. А., Пожалостин А. А., Панкратов А. А.* Кинематика точки и простейшие движения твердого тела. — М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 1991.

- ▣ *Гершензон Е. М., Малов Н. Н.* Курс общей физики: Механика: Учеб. пособие для студентов физ.-мат. фак. пед. ин-тов. — 2-е изд., перераб. — М.: Просвещение, 1987, §§ 1.1—1.4.
- ▣ *Зисман Г. А., Тодес О. М.* Курс общей физики. Том I. Механика, молекулярная физика, колебания и волны. — Изд. 5-е. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1972, §§ 1, 2.
- ▣ *Курошев Г. Д., Смирнов Л. Е.* Основы геодезии и топографии. — СПб.: Изд-во СПбГУ, 1994.
- ▣ *Ландау Л. Д., Ахиезер А. И., Лифшиц Е. М.* Курс общей физики. Механика и молекулярная физика. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1965, § 6.
- ▣ *Павленко Ю. Г.* Начала физики: Учебник. — 2-е изд. перераб. и доп. — М.: Издательство "Экзамен", 2005, §§ 1.2.1—1.2.4, 1.3.1, 1.3.2, 1.3.4.
- ▣ *Пинский А. А., Граковский Г. Ю.* Физика. — 2-е изд., испр. — М.: ФОРУМ — ИНФРА-М, 2004., § 3.2.
- ▣ *Савельев И. В.* Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х т. Том 1. Механика. Молекулярная физика. — 3-е изд., испр. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987, §§ 1, 3, 5.
- ▣ *Стрелков С. П.* Механика. — Изд. 3-е, перераб. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1975. — 560 с., §§ 1—12.
- ▣ *Трофимова Т. И.* Курс физики: Учеб. пособие для вузов. — 6-е изд., стер. — М.: Высшая школа, 1999, §§ 1—4.
- ▣ *Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.* Фейнмановские лекции по физике. 1. Современная наука о природе. Законы механики. — М.: Мир, 1965, §§ 8.1—8.3, 8.5.

### Литература к Главе 3

- ▣ *Гершензон Е. М., Малов Н. Н.* Курс общей физики: Механика: Учеб. пособие для студентов физ.-мат. фак. пед. ин-тов. — 2-е изд., перераб. — М.: Просвещение, 1987, §§ 2.1—2.3, 2.5, 2.6, 2.8, 4.2, 4.3, 11.1.
- ▣ *Григорьев В. И., Мякишев Г. Я.* Силы в природе. — М.: Наука, 1983.
- ▣ *Зисман Г. А., Тодес О. М.* Курс общей физики. Том I. Механика, молекулярная физика, колебания и волны. — Изд. 5-е. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1972, §§ 3, 4.
- ▣ *Павленко Ю. Г.* Начала физики: Учебник. — 2-е изд. перераб. и доп. — М.: Издательство "Экзамен", 2005, §§ 1.4.1—1.4.3, 1.5.1, 1.5.5, 1.11.1, 6.1.1, 9.1.5, 9.2.3.

- ▣ *Пайерас Р. Е.* Законы природы / Пер. с англ. под ред. проф. *И. М. Халатникова*. — М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1962.
- ▣ *Пинский А. А., Граковский Г. Ю.* Физика. — 2-е изд., испр. — М.: ФОРУМ — ИНФРА-М, 2004, § 3.1.
- ▣ *Савельев И. В.* Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х т. Том 1. Механика. Молекулярная физика. — 3-е изд., испр. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987, §§ 7—9, 12, 13, 27.
- ▣ *Стрелков С. П.* Механика. — Изд. 3-е, перераб. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1975. — 560 с., §§ 12—24, 149.
- ▣ *Трофимова Т. И.* Курс физики: Учеб. пособие для вузов. — 6-е изд., стер. — М.: Высшая школа, 1999, §§ 5—7, 9, 34.
- ▣ *Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.* Фейнмановские лекции по физике. 1. Современная наука о природе. Законы механики. — М.: Мир, 1965, §§ 9.1—9.3, 10.1—10.3, 11.6, 12.1—12.6.

#### Литература к Главе 4

- ▣ *Аглонов С. В.* Геодинамика. — СПб.: Изд-во СПбГУ, 2001.
- ▣ *Богородский А. Ф.* Всемирное тяготение. — К.: Наукова думка, 1971.
- ▣ *Бурдаков В. Л., Зигель Ф. Ю.* Физические основы космонавтики. — М.: Атомиздат, 1975.
- ▣ *Гарднер М.* Теория относительности для миллионов. — М.: Атомиздат, 1979.
- ▣ *Гершензон Е. М., Малов Н. Н.* Курс общей физики: Механика: Учеб. пособие для студентов физ.-мат. фак. пед. ин-тов. — 2-е изд., перераб. — М.: Просвещение, 1987, §§ 11.2, 11.3, 11.9.
- ▣ *Грабовский Р. И.* Курс физики. — М.: Высшая школа, 1979.
- ▣ *Гребеников Е. А., Рябов Ю. А.* Поиски и открытия планет. — М.: Наука, 1984.
- ▣ *Грушинский Н. П., Грушинский А. Н.* В мире сил тяготения. — М.: Недра, 1971.
- ▣ *Демин В. Г.* Судьба Солнечной системы. — М.: Наука, 1975.
- ▣ *Зельдович Я. Б., Хлопов М. Ю.* Драма идей в познании природы. — М.: Наука, 1988.

- ☞ *Кауфман У.* Космические рубежи теории относительности. — М.: Мир, 1981.
- ☞ *Кинг Э. А.* Космическая геология. — М.: Мир, 1979.
- ☞ *Кононович Э. В., Мороз В. И.* Планеты Солнечной системы. — М.: Наука, 1986.
- ☞ *Короновский Н. В., Ясаманов Н. А.* Геология. — М.: Академия, 2003.
- ☞ *Ландау Л. Д., Китайгородский А. И.* Физические тела. — М.: Наука, 1982.
- ☞ *Литинов В. М.* В мире двойных звезд. — М.: Наука, 1986.
- ☞ *Маракушев А. А.* Происхождение Земли и природа ее эндогенной системы. — М.: Наука, 1999.
- ☞ *Марленский А. Д.* Основы космонавтики. — М.: Просвещение, 1985.
- ☞ *Маров М. Я.* Планеты Солнечной системы. — М.: Наука, 1986.
- ☞ *Мартынов Д. Я.* Курс общей астрофизики. — М.: Наука, 1979.
- ☞ *Морион Дж. Б.* Физика и физический мир. — М.: Мир, 1975.
- ☞ *Мэйсон Б.* Метеориты. — М.: Мир, 1965.
- ☞ *Нарликар Дж.* Неистовая Вселенная. — М.: Мир, 1985.
- ☞ *Нарликар Дж.* От черных облаков к черным дырам. — М.: Энергоатомиздат, 1989.
- ☞ *Николсон Н.* Тяготение, черные дыры и Вселенная. — М.: Мир, 1983.
- ☞ *Новиков И. Д., Фролов В. П.* Физика черных дыр. — М.: Наука, 1986.
- ☞ *Орленок В. В.* Основы геофизики. Учебное пособие. — Калининград, 2000. — 446 с.
- ☞ *Павленко Ю. Г.* Начала физики: Учебник. — 2-е изд. перераб. и доп. — М.: Издательство "Экзамен", 2005, §§ 1.8.1—1.8.3, 1.8.6, 1.9.7—1.9.15.
- ☞ *Рис М., Руффини Р., Уилер Дж.* Черные дыры, гравитационные волны и космология: Введение в современные исследования. — М.: Мир, 1977.
- ☞ *Рябов Ю. А.* Движения небесных тел. — М.: Наука, 1988.
- ☞ *Савельев И. В.* Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х т. Том 1. Механика. Молекулярная физика. — 3-е изд., испр. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987, §§ 45—47.
- ☞ *Сергеев М. Б., Сергеева Т. В.* Планета Земля. Развитие идей и представлений — М.: Интерпракс, 1994.
- ☞ *Стрелков С. П.* Механика. — Изд. 3-е, перераб. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1975. — 560 с., §§ 76, 77, 79, 80.

- ☞ *Трофимова Т. И.* Курс физики: Учеб. пособие для вузов. — 6-е изд., стер. — М.: Высшая школа, 1999, § 22.
- ☞ *Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.* Фейнмановские лекции по физике. 1. Современная наука о природе. Законы механики. — М.: Мир, 1965, §§ 7.1, 7.2, 7.4—7.8, 9.6, 13.4.
- ☞ *Фролов В. П.* Введение в физику черных дыр. — М.: Знание, 1983.
- ☞ *Хокинг С. В.* Краткая история времени от большого взрыва до черных дыр. — М.: Амфора, 2001.
- ☞ *Шapiro С., Тьюколски С.* Черные дыры, белые карлики и нейтронные звезды. Часть 2. — М.: Мир, 1985.
- ☞ *Шкловский И.* Звезды: их рождение, жизнь и смерть. — М.: Наука, 1984.

#### Литература к Главе 5

- ☞ *Андреев Б. А.* Геологическое истолкование гравитационных аномалий. — М.: Недра, 1985.
- ☞ *Аплонов С. В.* Геодинамика. — СПб.: Изд-во СПбГУ, 2001.
- ☞ *Бондаренко В. М., Демура Г. В., Ларионов А. М.* Общий курс геофизических методов разведки. — М.: Недра, 1986.
- ☞ *Ботт М.* Внутреннее строение Земли. — М.: Мир, 1974.
- ☞ *Буллен К. Е.* Плотность Земли. — М.: Мир, 1978.
- ☞ Геофизические методы поисков и разведки / Под ред. *В. П. Захарова.* — Л.: Недра, 1982.
- ☞ *Гершензон Е. М., Малов Н. Н.* Курс общей физики: Механика: Учеб. пособие для студентов физ.-мат. фак. пед. ин-тов. — 2-е изд., перераб. — М.: Просвещение, 1987, §§ 11.5, 11.7, 11.8.
- ☞ *Гладкий К. В.* Гравиразведка и магниторазведка. — М.: Недра, 1986.
- ☞ *Горге В.* Гравиметрия. — М.: Мир, 1999.
- ☞ *Грушинский Н. П.* Гравиразведка и магниторазведка. — М.: Наука, 1976.
- ☞ *Грушинский Н. П., Грушинский А. Н.* В мире сил тяготения. — М.: Недра, 1985.
- ☞ *Грушинский Н. П., Сажина Н. Б.* Гравитационная разведка. — 3-е изд. — М.: Недра, 1981.
- ☞ *Дягилева А. И., Андриевич В. В.* Основы геофизических методов разведки. — М.: Недра, 1987.

- Жуков М. М., Славин В. И., Дунаева Н. Н. Основы геологии. — М.: Недра, 1971.
- Иванов А. Г. Физика в разведке земных недр. — М.: Недра, 1971.
- Кири П., Брукс М. Введение в геофизическую разведку. — М.: Мир, 1988.
- Космодром / Под общ. ред. А. П. Вольского. — М.: Воениздат, 1977.
- Левантовский В. И. Механика космического полета. — М.: Наука, 1980.
- Магницкий В. А. Внутреннее строение и физика Земли. — М.: Недра, 1965.
- Марленский А. Д. Основы космонавтики. — М.: Просвещение, 1985.
- Мецерыков Г. А. Задачи теории потенциала и обобщенная Земля. — М.: Наука, 1991.
- Мудрецова Е. А. Гравиразведка. Справочник геофизика. — М.: Недра, 1981.
- Павленко Ю. Г. Начала физики: Учебник. — 2-е изд. перераб. и доп. — М.: Издательство "Экзамен", 2005, §§ 1.3.3, 1.8.5—1.8.10, 1.9.1—1.9.6.
- Савельев И. В. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х т. Том 1. Механика. Молекулярная физика. — 3-е изд., испр. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987, §§ 16, 46, 48.
- Смирнов В. С. Курс гравиразведки. — Л.: Недра, 1980.
- Соколов К. П. Геофизические методы разведки. — М.: Недра, 1966.
- Стейси Ф. Д. Физика Земли. — М.: Мир, 1982.
- Стрелков С. П. Механика. — Изд. 3-е, перераб. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1975. — 560 с., §§ 46, 80.
- Торге В. Гравиметрия. — М.: Мир, 1999.
- Трофимова Т. И. Курс физики: Учеб. пособие для вузов. — 6-е изд., стер. — М.: Высшая школа, 1999, §§ 23—26.
- Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. 1. Современная наука о природе. Законы механики. — М.: Мир, 1965, § 14.5.
- Хмелевской В. К., Попов М. Г., Калинин А. В. и др. Геофизические методы исследования: Учебн. пособие для вузов. / Под ред. В. К. Хмелевского. — М.: Недра, 1988.
- Цубои Т. Гравитационное поле Земли / Пер. с япон. — М.: Мир, 1982. — 286 с.
- Чечкин С. А. Основы геофизики. — Л.: Гидрометеиздат, 1990.

- Шарма П. Геофизические методы в региональной геологии. — М.: Мир, 1989.
- Юзефович А. П., Огородникова Л. В. Гравиметрия. — М.: Недра, 1980.

### Литература к Главе 6

- Апლოнов С. В. Геодинамика. — СПб.: Изд-во СПбГУ, 2001.
- Вайсберг Дж. Погода на Земле. — М.: Гидрометеиздат, 1980.
- Вейль П. Популярная океанография. — Л.: Гидрометеиздат, 1977.
- Гершензон Е. М., Малов Н. Н. Курс общей физики: Механика: Учеб. пособие для студентов физ.-мат. фак. пед. ин-тов. — 2-е изд., перераб. — М.: Просвещение, 1987, §§ 3.5, 7.1, 10.1—10.3, 10.5, 10.6.
- Гиматудинов Ш. К. Физика нефтяных и газовых пластов. — Л.: Недра, 1979.
- Гольдштейн М. Н. Механические свойства грунтов. — М.: Изд-во литературы по строительству, 1971.
- Земля. Введение в общую геологию в 2-х т. / Ферхуген Дж., Тернер Ф., Вейс Л. и др. Пер. на рус. яз. — М.: Мир, 1974.
- Зисман Г. А., Тодес О. М. Курс общей физики. Том I. Механика, молекулярная физика, колебания и волны. — Изд. 5-е. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1972, §§ 51, 70.
- Зоненшайн Л. П., Савостин Л. А. Введение в геодинамику. — М.: Недра, 1979.
- Иванов И. П., Тржцинский Ю. Б. Инженерная геодинамика. — СПб.: Наука, 2001.
- Кокс А., Харт Р. Тектоника плит. — М.: Мир, 1989.
- Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. — М.: Машиностроение, 1997.
- Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. — М.: Физматгиз, 1959.
- Ломтадзе В. Д. Инженерная геология. Инженерная петрология. — Л.: Недра, 1984.
- Мироненко В. А. Динамика подземных вод. — М.: Недра, 1982.
- Мироненко В. А., Шестаков В. М. Основы гидрогеомеханики. — М.: Недра, 1974.
- Михайловский Е. Аэродинамика автомобиля. — М.: Машиностроение, 1973.

- Монин А. С., Яглом А. М. Статистическая гидромеханика. Том 1. — СПб.: Гидрометеиздат, 1992.
- Нейбургер М., Эдинггер Дж., Боннер У. Познание окружающей нас атмосферы. — М.: Знание, 1986.
- Павленко Ю. Г. Начала физики: Учебник. — 2-е изд. перераб. и доп. — М.: Издательство "Экзамен", 2005, §§ 3.3.1—3.3.5, 3.4.1, 3.4.2, 3.4.7.
- Поваренных А. С. Твердость минералов. — Киев: Изд-во АН УССР, 1963.
- Регель В. Р. Кинетическая природа прочности твердых тел. — М.: Наука, 1974.
- Савельев И. В. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х т. Том 1. Механика. Молекулярная физика. — 3-е изд., испр. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987, §§ 14, 15, 72, 73, 75, 76.
- Сергеев Е. М. Грунтоведение. — М.: Изд-во МГУ, 1971.
- Стрелков С. П. Механика. — Изд. 3-е, перераб. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1975. — 560 с., §§ 38—42, 72—75, 81—92, 100—104, 112, 115, 116.
- Теоретические основы инженерной геологии. Механико-математические основы / Под ред. Е. Сергеева. — М.: Недра, 1986.
- Трофимова Т. И. Курс физики: Учеб. пособие для вузов. — 6-е изд., стер. — М.: Высшая школа, 1999, §§ 8, 21, 28—31.
- Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. 1. Современная наука о природе. Законы механики. — М.: Мир, 1965, § 12.2.
- Чулановская М. В. Курс физики для биологов. Часть I. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1972, § 25.
- Шестаков В. М. Динамика подземных вод. — М.: Изд-во МГУ, 1979.

#### Литература к Главе 7

- Гарленд Дж. Д. Форма Земли и сила тяжести. — М.: Мир, 1967.
- Гернет М. М. Курс теоретической механики: Учебник для вузов. — 4-е изд., перераб. — М.: Высшая школа, 1981.
- Гершензон Е. М., Малов Н. Н. Курс общей физики: Механика: Учеб. пособие для студентов физ.-мат. фак. пед. ин-тов. — 2-е изд., перераб. — М.: Просвещение, 1987, §§ 3.4, 6.1, 6.3, 6.4.

- Голубев Ю. Ф. Основы теоретической механики: Учебник. — 2-е изд., перераб. и дополн. — М.: Изд-во МГУ, 2000.
- Гребенников Е. А. Межпланетные полеты. — М.: Наука, 1975.
- Гэтланд К. Космическая техника. — М.: Мир, 1986.
- Зисман Г. А., Тодес О. М. Курс общей физики. Том I. Механика, молекулярная физика, колебания и волны. — Изд. 5-е. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1972, § 4.
- Ишлинский А. Ю. Механика относительного движения и силы инерции. — М.: Наука, 1980.
- Куликов К. А. Вращение Земли. — М.: Недра, 1985.
- Ландау Л. Д., Ахиезер А. И., Лифшиц Е. М. Курс общей физики. Механика и молекулярная физика. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1965, § 31.
- Мецзяков Г. А. Задачи теории потенциала и обобщенная Земля. — М.: Наука, 1991.
- Недзвецкая И. В. Силы инерции. Конспект лекций. — СПб.: Изд. РГГМУ, 2003.
- Обухов А. М. Турбулентность и динамика атмосферы. — Л.: Гидрометеоиздат, 1988.
- Павленко Ю. Г. Начала физики: Учебник. — 2-е изд. перераб. и доп. — М.: Издательство "Экзамен", 2005, §§ 1.5.4, 1.11.1—1.11.4.
- Савельев И. В. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х т. Том 1. Механика. Молекулярная физика. — 3-е изд., испр. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987, §§ 32—34.
- Стрелков С. П. Механика. — Изд. 3-е, перераб. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1975. — 560 с., §§ 27, 43, 45, 49, 92.
- Трофимова Т. И. Курс физики: Учеб. пособие для вузов. — 6-е изд., стер. — М.: Высшая школа, 1999, §§ 10, 27.
- Ушаков С. А., Красс М. С. Сила тяжести и вопросы механики недр Земли. — М.: Недра, 1972.
- Циолковский К. Э. Реактивные летательные аппараты. — М.: Наука, 1964.
- Цубои Т. Гравитационное поле Земли / Пер. с япон. — М.: Мир, 1982. — 286 с.
- Чулановская М. В. Курс физики для биологов. Часть I. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1972, § 27.
- Штернфельд А. А. Введение в космонавтику. — М.: Наука, 1974.

## Литература к Главе 8

- 📖 *Аплонов С. В.* Геодинамика. — СПб.: Изд-во СПбГУ, 2001.
- 📖 *Гершензон Е. М., Малов Н. Н.* Курс общей физики: Механика: Учеб. пособие для студентов физ.-мат. фак. пед. ин-тов. — 2-е изд., перераб. — М.: Просвещение, 1987, §§ 2.9, 2.10, 3.6.
- 📖 *Земля. Введение в общую геологию в 2-х т. / Ферхуген Дж., Тернер Ф., Вейс Л. и др. / Пер. на рус. яз.* — М.: Мир, 1974.
- 📖 *Зисман Г. А., Тодес О. М.* Курс общей физики. Том I. Механика, молекулярная физика, колебания и волны. — Изд. 5-е. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1972, § 5—8.
- 📖 *Павленко Ю. Г.* Начала физики: Учебник. — 2-е изд. перераб. и доп. — М.: Издательство "Экзамен", 2005, §§ 1.6.1—1.6.2, 1.6.4—1.6.8.
- 📖 *Савельев И. В.* Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х т. Том 1. Механика. Молекулярная физика. — 3-е изд., испр. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987, §§ 19—22, 24, 25, 28.
- 📖 *Стрелков С. П.* Механика. — Изд. 3-е, перераб. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1975. — 560 с., §§ 28—37.
- 📖 *Трофимова Т. И.* Курс физики: Учеб. пособие для вузов. — 6-е изд., стер. — М.: Высшая школа, 1999, §§ 11—13, 15.
- 📖 *Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.* Фейнмановские лекции по физике. 1. Современная наука о природе. Законы механики. — М.: Мир, 1965, §§ 4.1—4.4, 10.4, 13.1—13.3, 14.1, 14.3, 14.4.
- 📖 *Чулановская М. В.* Курс физики для биологов. Часть I. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1972, §§ 12—15.
- 📖 *Шварц К., Гольдфарб Т.* Поиск закономерностей в физическом мире / Пер. с англ. — М.: Мир, 1977.
- 📖 *Шебалин О. Д.* Физические основы механики и акустики. — М.: Высшая школа, 1981.

## Литература к Главе 9

- 📖 *Бобровский А. П., Бармасов А. В., Бармасова А. М. и др.* Контрольная работа по дисциплине "Физика". Раздел "Вращение твердого тела" / Отв. ред. А. В. Логинов. — СПб.: Изд-во РГГМУ, 2006.
- 📖 *Гершензон Е. М., Малов Н. Н.* Курс общей физики: Механика: Учеб. пособие для студентов физ.-мат. фак. пед. ин-тов. — 2-е изд., перераб. — М.: Просвещение, 1987, §§ 5.1, 5.2, 5.9.

- ☞ *Зисман Г. А., Тодес О. М.* Курс общей физики. Том I. Механика, молекулярная физика, колебания и волны. — Изд. 5-е. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1972, §§ 10, 11.
- ☞ *Павлов В. А.* Гироскопический эффект, его проявления и использование. — 5-е изд., перераб. и доп. — Л.: Судостроение, 1985.
- ☞ *Савельев И. В.* Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х т. Том 1. Механика. Молекулярная физика. — 3-е изд., испр. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987, §§ 36—39, 42, 44.
- ☞ *Стрелков С. П.* Механика. — Изд. 3-е, перераб. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1975. — 560 с., §§ 50—71.
- ☞ *Трофимова Т. И.* Курс физики: Учеб. пособие для вузов. — 6-е изд., стер. — М.: Высшая школа, 1999, §§ 9, 16—20.
- ☞ *Шестов С. А.* Гироскоп на земле, в небесах и на море. — М.: Знание, 1989.

#### Литература к Главе 10

- ☞ *Акоста В., Кован К., Грэм Б.* Основы современной физики. — М.: Просвещение, 1981.
- ☞ *Гершензон Е. М., Малов Н. Н.* Курс общей физики: Механика: Учеб. пособие для студентов физ.-мат. фак. пед. ин-тов. — 2-е изд., перераб. — М.: Просвещение, 1987, §§ 4.1, 4.3—4.6.
- ☞ *Гинзбург В. Л.* О теории относительности. — М.: Наука, 1979.
- ☞ *Зисман Г. А., Тодес О. М.* Курс общей физики. Том I. Механика, молекулярная физика, колебания и волны. — Изд. 5-е. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1972, § 9.
- ☞ *Кауфман У.* Космические рубежи теории относительности. — М.: Мир, 1981.
- ☞ *Кузнецов Б. Г.* От Галилея до Эйнштейна. — М.: Наука, 1969.
- ☞ *Либшер Д. Э.* Теория относительности с циркулем и линейкой. — М.: Мир, 1980.
- ☞ *Павленко Ю. Г.* Начала физики: Учебник. — 2-е изд. перераб. и доп. — М.: Издательство "Экзамен", 2005, §§ 6.1.2—6.1.4.
- ☞ *Пинский А. А., Граковский Г. Ю.* Физика. — 2-е изд., испр. — М.: ФОРУМ — ИНФРА-М, 2004., §§ 3.4, 3.5, 3.7, 3.8.
- ☞ *Савельев И. В.* Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х т. Том 1. Механика. Молекулярная физика. — 3-е изд., испр. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987, §§ 62—65, 67, 68, 70.

- 📖 *Славин И. А.* Преобразование времени, длины и скорости в специальной теории относительности. — СПб.: Изд. РГГМИ, 1997.
- 📖 *Стрелков С. П.* Механика. — Изд. 3-е, перераб. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1975. — 560 с., §§ 149—161.
- 📖 *Тейлор Э., Уилер Дж.* Физика пространства-времени. — М.: Мир, 1971.
- 📖 *Трофимова Т. И.* Курс физики: Учеб. пособие для вузов. — 6-е изд., стер. — М.: Высшая школа, 1999, §§ 34—36, 40.
- 📖 *Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.* Фейнмановские лекции по физике. 1. Современная наука о природе. Законы механики. — М.: Мир, 1965, § 10.5.
- 📖 *Франкфурт У. И., Френк А. М.* Физика наших дней. — М.: Наука, 1971.
- 📖 *Шмутцер Э.* Теория относительности — современное представление. Путь к единству физики. — М.: Мир, 1981.
- 📖 *Эйнштейн А., Инфельд Л.* Эволюция физики. — М.: ГИТТЛ, 1956.
- 📖 *Яковлева Т. Ю., Бармасов А. В., Бармасова А. М. и др.* Контрольная работа по дисциплине "Физика". Раздел "Основы специальной теории относительности" / Отв. ред. *А. В. Логинов.* — СПб.: Изд-во РГГМУ, 2007.



# Предметный указатель

## А

Абсцисса 57  
Аддитивность 99  
Акселерограф 223  
Акселерометр 222  
Аномалия:  
◇ гравитационная 166  
◇ Фая 167  
Апогей 157  
Аппликата 58  
Астероиды 120  
Астрономия 111  
Афелий 109  
Аэрогравиметрия 173

## Б

Биофизика 21

## В

Ватт 248  
Вектор 48  
Величина относительная 64  
Венера 116  
Вес тела 149  
Весы 150  
◇ крутильные 128  
◇ пружинные 149  
Взаимодействие 85  
◇ гравитационное 95  
◇ сильное 95

◇ слабое 95  
◇ фундаментальное 95  
◇ электромагнитное 95  
◇ ядерное 95  
Время 36  
Вселенная 111  
Вязкость 204  
◇ динамическая 206  
◇ кинематическая 208

## Г

Галактика 111  
Галилео 144  
Геод 162  
Геология 20  
Геофизика 20  
Геоэкология 25  
Гибкость 184  
Гидроаэромеханика 196  
Гидродинамика 197  
Гипотеза Ньютона 205  
Гироскоп 283  
◇ колебательный 288  
◇ неуравновешенный 283  
◇ тяжелый 283  
◇ уравновешенный 283  
Гиростабилизатор 287  
Гистерезис упругий 189  
Год световой 42  
Гравиметр 172  
Гравиметрия 171

Гравитация 131  
 Гравитон 131  
 Градиент скорости течения 206  
 Гривна киевская 40

## Д

Двигатель:  
 ◇ вечный 258  
 ◇ воздушно-реактивный 243  
 ◇ ракетный 240  
 ◇ ракетный, жидкостный 240  
 ◇ турбовинтовой 243  
 ◇ турбокомпрессорный 243  
 ◇ турбореактивный 244  
 ◇ турбореактивный, двухконтурный 244

Движение:

◇ вращательное 61  
 ◇ криволинейное 77  
 ◇ механическое 34  
 ◇ неравномерное 71  
 ◇ переменное 71  
 ◇ плоское 83  
 ◇ поступательное 62  
 ◇ прямолинейное 65  
 ◇ равномерное 65  
 ◇ равнопеременное 71  
 ◇ равноускоренное 71  
 ◇ реактивное 236

Десятина казенная 40

Деформация 175

◇ изгиба 180  
 ◇ кручения 180  
 ◇ объема 176  
 ◇ остаточная 181  
 ◇ пластическая 178  
 ◇ поперечного сечения 190  
 ◇ сдвига 176  
 ◇ упругая 176

Джоуль 246

Диаграмма напряжений 181

Динамика 34

Динамометр 93

Долгота 59

Дыра черная 135

## Е

Единица:

◇ астрономическая 41  
 ◇ гравитационная 144

Единица физической величины:

◇ основная 42  
 ◇ производная 42

## Ж

Жесткость 182

◇ пружины 189

## З

Закон:

◇ Бэра 234  
 ◇ всемирного тяготения 128  
 ◇ вязкого трения, основной 205  
 ◇ Гука 185  
 ◇ движения 62  
 ◇ действия и противодействия 103  
 ◇ динамики основной, для вращательного движения 275  
 ◇ инерции 87  
 ◇ Кеплера, второй 109  
 ◇ Кеплера, первый 108  
 ◇ Кеплера, третий 110  
 ◇ Кулона—Амонтона 195  
 ◇ Максвелла 208  
 ◇ независимости движений 64  
 ◇ Ньютона, второй 96  
 ◇ Ньютона, первый 91  
 ◇ Ньютона, третий 101  
 ◇ основной релятивистской механики 311  
 ◇ основной, динамики материальной точки 96  
 ◇ равноускоренного движения 74  
 ◇ сложения скоростей классический 68  
 ◇ сохранения и превращения энергии 258  
 ◇ сохранения импульса 104  
 ◇ сохранения массы и энергии 313  
 ◇ сохранения момента импульса 278

- ◇ сохранения релятивистской массы 313
- ◇ сохранения энергии в механике 258
- ◇ Стокса 210
- ◇ тяготения Ньютона 128
- Земля 116

## И

- Излучение гравитационное 131
- Измерение 37
- Изостазия 265
- Импульс 100
- ◇ полный механический 106
- ◇ релятивистский 309
- ◇ силы 100
- ◇ элементарный 100
- Инертность 87
- Инерция 87
- Интервал:
  - ◇ релятивистский 308
  - ◇ четырехмерный 296

## К

- Каротаж гравитационный 174
- Киловатт-час 249
- Килограмм 97
- Кинематика 34, 57
- Ковкость 184
- Количество движения 100
- Коллапс гравитационный 134
- Коллапсар 134
- Кометы 122
- Координаты 57
  - ◇ декартовы 57
  - ◇ полярные 58
  - ◇ сферические 59
  - ◇ цилиндрические 59
- Координаты прямоугольные 57
- Космодром 160
- Коэффициент:
  - ◇ вязкости, кинематический 208
  - ◇ деформации 185
  - ◇ динамической вязкости 206
  - ◇ лобового сопротивления 212
  - ◇ поперечных деформаций 191

- ◇ Пуассона 191
- ◇ трения скольжения 195
- Крутизна 67

## Л

- Линия тока 197
- Локоть 40

## М

- Марс 117
- Масса 97
  - ◇ гравитационная 132
  - ◇ инертная 96
  - ◇ релятивистская 309
  - ◇ тяготеющая 132
  - ◇ тяжелая 132
- Материал:
  - ◇ пластичный 182
  - ◇ хрупкий 182
- Маятник Фуко 234
- Меридиан:
  - ◇ географический 60
  - ◇ начальный 60
- Меркурий 115
- Метр 41
- Механика 34
  - ◇ классическая 34
  - ◇ небесная 107
  - ◇ релятивистская 298
- Модуль:
  - ◇ всестороннего сжатия 190
  - ◇ объемного сжатия 190
  - ◇ объемной упругости 190
  - ◇ продольной упругости 187
  - ◇ сдвига 190
  - ◇ упругости, объемный 190
  - ◇ Юнга 187
- Моль 43
- Момент:
  - ◇ импульса 275
  - ◇ импульса относительно оси 274
  - ◇ инерции 275
  - ◇ кинетический, собственный 286
  - ◇ силы 273
  - ◇ силы относительно оси 273
  - ◇ силы относительно точки 274

Мощность 248

◇ мгновенная 248

## Н

Направление:

◇ вертикальное 229

◇ отвеса 229

Напряжение механическое 180

Напряженность поля земного тяготения 140

Насос струйный 201

Начало координат 57

Невесомость 152

Нептун 119

Нутация 284

Ньютон 97

## О

Объединение великое 95

Овал 108

Орбита 108

◇ восходящая 157

◇ геостационарная 156

◇ нисходящая 157

◇ полярная 156

◇ солнечно-синхронизированная 157

Ордината 57

Орт 49

Оси координат 57

Ось:

◇ абсцисс 58

◇ аппликат 58

◇ вращения 271

◇ ординат 58

◇ полярная 58

Отжиг 190

Относительность одновременности 295

## П

Падение свободное 142

Парадокс:

◇ часов 305

◇ близнецов 307

Параллель земная 60

Парсек 42

Паскаль 180

Паскаль-секунда 207

Перегрузка 221

Перемещение 63

Перигей 157

Перигелий 109

Период 80

Планеты малые 120

Плутон 119

Поверхность эквипотенциальная 164

Поле 96

◇ гравитационное 139, 163

◇ однородное 255

◇ силовое 139

◇ силы тяжести 163

◇ стационарное 255

◇ тяготения 139

◇ центральное 255

Полюс 58

Поправка:

◇ Буге 167

◇ Фая 167

Постоянная:

◇ гравитационная 128

◇ Лямэ 192

◇ тяготения Ньютона 128

Постулаты Эйнштейна 294

Потенциал 163

◇ гравитационный 164

Поток вектора 140

Предел:

◇ пропорциональности 181

◇ прочности 182

◇ текучести 182

◇ упругости 181

Преобразования:

◇ Галилея 88

◇ Лоренца 298

Прецессия 284

◇ вынужденная 286

◇ регулярная 285

Приливы 126

Принцип:

◇ Бора 37

◇ постоянства скорости света 294

◇ суперпозиции 130

◇ эквивалентности 133

Принцип относительности:

- ◇ Галилея 88
- ◇ Эйнштейна 89

Природопользование 25

Произведение:

- ◇ векторное 53
- ◇ скалярное 53
- ◇ смешанное 54

Пространство 36

Псевдовектор 81

Псевдосила 221

Пуаз 207

Путь 63

Пядь 40

## Р

Работа:

- ◇ силы 245
- ◇ элементарная 245

Радиус гравитационный 135

Радиус-вектор 58

Разведка гравиметрическая 171

Размерность 37

Ракета 237

◇ многоступенчатая 240

◇ носитель 240

Растяжение 179

◇ одноосное 179

## С

Сажень 40

Сатурн 119

Сдвиг 179

◇ абсолютный 190

◇ относительный 190

Седна 121

Секунда 38

Сжатие 179

Сила 92

◇ Архимеда 210

◇ выталкивающая 210

◇ инерции 220

◇ инерции кориолисова 232

◇ консервативная 255

◇ Кориолиса 232

◇ лошадиная 249

◇ нормального давления 149

◇ подъемная 202

◇ равнодействующая 92

◇ реакции опоры 149

◇ сдвига 206

◇ трения 193

◇ трения качения 196

◇ трения покоя 194

◇ трения скольжения 194

◇ тяги 239

◇ тяготения 150

◇ тяжести 142

◇ упругая 175

◇ фиктивная 221

◇ центробежная 226

◇ центростремительная 226

Силы внутренние 102

Система:

◇ замкнутая 104

◇ изолированная 104

◇ консервативная 259

◇ отсчета 61

◇ отсчета неинерциальная 219

◇ солнечная 112

Система единиц 42

◇ гауссова 44

◇ Джорджи 43

◇ естественная 47

◇ международная 43

◇ рационализованная 42

◇ СГС 42

◇ СГС электромагнитная 42

◇ СГС электростатическая 42

◇ симметричная 47

◇ техническая 43

◇ Хартри 47

Система отсчета:

◇ гелиоцентрическая 85

◇ геоцентрическая 86

◇ инерциальная 85

Скаляр 47

Скоростной напор 212

Скорость 65

◇ абсолютная 68

◇ гиперзвуковая 70

Скорость (*прод.*):

- ◇ дозвуковая 70
  - ◇ космическая, вторая 157
  - ◇ космическая, первая 154
  - ◇ линейная 79
  - ◇ мгновенная 67
  - ◇ начальная 72
  - ◇ относительная 68
  - ◇ переносная 68
  - ◇ равномерного прямолинейного движения 66
  - ◇ сверхзвуковая 70
  - ◇ средняя 74
  - ◇ угловая 81
- Сложение сил 92
- Солнце 114
- Состояние сверхтекучее 208
- Статика 34
- Степень пустотности 214
- Стокс 208
- Столкновение 260
- Струя 197

## Т

- Твердость 182
- Текстура 264
- Текучесть 182
- Тело:
- ◇ пластичное 177
  - ◇ твердое абсолютно 269
  - ◇ упругое 177
- Теорема:
- ◇ Гюйгенса—Штейнера 280
  - ◇ о движении центра масс 101
  - ◇ о кинетической энергии 252
  - ◇ Торричелли 201
  - ◇ Штейнера 280
- Теория электрослабого взаимодействия 95
- Течение:
- ◇ вихревое 198
  - ◇ ламинарное 197
  - ◇ слоистое 197
  - ◇ турбулентное 198
- Точка материальная 35
- Траектория 63
- ◇ баллистическая 148

Трение 193

- ◇ внешнее 193
  - ◇ внутреннее 204
  - ◇ покоя 193
- Труба аэродинамическая 213
- Трубка тока 197
- Турбулентность 198
- Тяготение 131

## У

Угол:

- ◇ атаки 202
  - ◇ поворота 80
  - ◇ полярный 58
  - ◇ сдвига 190
- Удар 260
- ◇ неупругий 260
  - ◇ неупругий абсолютно 262
  - ◇ упругий 260
  - ◇ упругий абсолютно 261
  - ◇ центральный 260
- Удлинение относительное 180
- Ультрацентрифуга 230
- Упругость 177
- Уравнение:
- ◇ Бернулли 200
  - ◇ движения 96
  - ◇ Мещерского 239
- Уран 119
- Ускорение 71
- ◇ касательное 79
  - ◇ Кориолиса 232
  - ◇ кориолисово 232
  - ◇ мгновенное 71, 83
  - ◇ нормальное 79
  - ◇ свободного падения 71
  - ◇ силы тяжести 71
  - ◇ тангенциальное 79
  - ◇ угловое 81
  - ◇ центростремительное 79

## Ф

- Физика 13
- Формула:
- ◇ Ньютона 205
  - ◇ Циолковского 238
- Функция состояния 251

**Х**

Хромосфера 114  
Хрупкость 184

**Ц**

Центр:  
◇ инерции 101  
◇ масс 101  
Центрифуга 230  
Центрифугирование 230

**Ч**

Частота вращения 80  
Четверть 40  
Число:  
◇ Маха 70  
◇ Рейнольдса 209  
◇ хрупкости 184

**Ш**

Широта 59  
Шкала:  
◇ хрупости 184  
◇ Мооса 182

**Э**

Экватор 60  
Экология 22  
Эксцентриситет 109  
Электронвольт 250  
Эллипс 108  
Энергия 249  
◇ кинетическая 251  
◇ кинетическая полная 279  
◇ кинетическая релятивистской  
частицы 311  
◇ покоя 312  
◇ полная 254  
◇ потенциальная 252  
◇ собственная 312  
◇ центробежная 254  
Эрг 246  
Эталон 37  
Эффект:  
◇ гироскопический 285  
◇ Магнуса 204  
◇ релятивистский 297

**Ю**

Юпитер 119