

# СОДЕРЖАНИЕ

## Раздел 1

### МЕХАНИКА

<b>1.1. Кинематика</b> .....	9	<b>1.3. Статика</b> .....	46
1.1.1. Механическое движение. Относительность механического движения. Система отсчета .....	9	1.3.1. Момент силы .....	46
1.1.2. Материальная точка .....	10	1.3.2. Равновесие механической системы (абсолютно твердого тела) .....	47
1.1.3. Скорость материальной точки .....	14	1.3.3. Закон Паскаля .....	48
1.1.4. Ускорение материальной точки .....	16	1.3.4. Давление покоящейся жидкости на дно и стенки сосуда (гидростатическое давление) ..	49
1.1.5. Равномерное прямолинейное движение .....	16	1.3.5. Закон Архимеда .....	51
1.1.6. Равноускоренное прямолинейное движение ...	18	• <b>Примеры заданий ЕГЭ по теме 1.3 «Статика»</b> .....	56
1.1.7. Свободное падение. Ускорение свободного падения .....	19	<b>1.4. Законы сохранения в механике</b> .....	58
1.1.8. Равномерное движение точки по окружности .....	21	1.4.1. Импульс тела .....	58
1.1.9. Поступательное и вращательное движение твердого тела .....	23	1.4.2. Импульс системы тел. Закон изменения импульса .....	58
• <b>Примеры заданий ЕГЭ по теме 1.1 «Кинематика»</b> ..	24	1.4.3. Закон сохранения импульса .....	59
<b>1.2. Динамика</b> .....	26	1.4.4. Работа силы .....	60
1.2.1. Инерциальные системы отсчета. Первый закон Ньютона. Принцип относительности Галилея ...	26	1.4.5. Мощность силы .....	62
1.2.2. Масса тела. Плотность вещества .....	29	1.4.6. Кинетическая энергия. Закон изменения кинетической энергии .....	62
1.2.3. Взаимодействие. Сила. Принцип суперпозиции сил .....	30	1.4.7. Потенциальная энергия .....	64
1.2.4. Второй закон Ньютона .....	32	1.4.8. Закон изменения и сохранения механической энергии .....	64
1.2.5. Третий закон Ньютона .....	34	• <b>Примеры заданий ЕГЭ по теме 1.4 «Законы сохранения в механике»</b> .....	70
1.2.6. Закон всемирного тяготения .....	35	<b>1.5. Механические колебания и волны</b> .....	72
1.2.7. Движение небесных тел .....	38	1.5.1. Гармонические колебания .....	73
1.2.8. Сила упругости. Закон Гука .....	39	1.5.2. Свободные колебания математического и пружинного маятников .....	74
1.2.9. Сила трения .....	40	1.5.3. Вынужденные колебания. Резонанс .....	77
1.2.10. Давление .....	42	1.5.4. Упругие волны (механические волны) .....	79
• <b>Примеры заданий ЕГЭ по теме 1.2 «Динамика»</b> .....	44	1.5.5. Звук (звуковые волны) .....	85
		• <b>Примеры заданий ЕГЭ по теме 1.5 «Механические колебания и волны»</b> .....	92
		• <b>Тренировочный тест к разделу 1 «Механика»</b> .....	94

## Раздел 2

### МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА. ТЕРМОДИНАМИКА

<b>2.1. Молекулярная физика</b> . . . . .	100
2.1.1. Модели строения газов, жидкостей и твердых тел . . . . .	102
2.1.2. Тепловое движение атомов и молекул вещества . . . . .	105
2.1.3. Взаимодействие частиц вещества . . . . .	105
2.1.4. Броуновское движение. Диффузия . . . . .	106
2.1.5. Модель идеального газа в МКТ . . . . .	108
2.1.6. Основное уравнение МКТ (давление газа) . . . . .	108
2.1.7. Абсолютная температура . . . . .	109
2.1.8. Температура как мера кинетической энергии . . . . .	111
2.1.9. Уравнение $p = nkT$ . . . . .	111
2.1.10. Уравнение Менделеева-Клапейрона (уравнение состояния идеального газа) . . . . .	112
2.1.11. Закон Дальтона . . . . .	113
2.1.12. Изопроцессы в газах . . . . .	114
2.1.13. Насыщенные и ненасыщенные пары . . . . .	116
2.1.14. Влажность воздуха . . . . .	117
2.1.15. Изменение агрегатных состояний вещества: испарение и конденсация, кипение жидкости . . . . .	118
2.1.16. Изменение агрегатных состояний вещества: плавление и кристаллизация . . . . .	122
2.1.17. Преобразование энергии в фазовых переходах . . . . .	124
• <b>Примеры заданий ЕГЭ по теме 2.1</b> «Молекулярная физика» . . . . .	126
<b>2.2. Термодинамика</b> . . . . .	128
2.2.1. Тепловое равновесие и температура . . . . .	128
2.2.2. Внутренняя энергия . . . . .	129
2.2.3. Теплообмен . . . . .	130
2.2.4. Количество теплоты. Удельная теплоемкость вещества . . . . .	133
2.2.5. Удельная теплота парообразования, плавления, сгорания . . . . .	134

2.2.6. Работа в термодинамике . . . . .	136
2.2.7. Первый закон термодинамики . . . . .	137
2.2.8. Второй закон термодинамики. Необратимость . . . . .	140
2.2.9. Принцип действия тепловых двигателей . . . . .	140
2.2.10. Цикл Карно . . . . .	141
2.2.11. Уравнение теплового баланса . . . . .	143
• <b>Примеры заданий ЕГЭ по теме 2.2</b> «Термодинамика» . . . . .	144
• <b>Тренировочный тест к разделу 2</b> «Молекулярная физика. Термодинамика» . . . . .	146

## Раздел 3

### ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

<b>3.1. Электрическое поле</b> . . . . .	152
3.1.1. Электрические заряды. Закон сохранения заряда . . . . .	152
3.1.2. Закон Кулона . . . . .	154
3.1.3. Электрическое поле. Действие электрического поля на электрические заряды . . . . .	155
3.1.4. Напряженность электрического поля . . . . .	156
3.1.5. Принцип суперпозиции электрических полей . . . . .	157
3.1.6. Потенциальность электростатического поля . . . . .	158
3.1.7. Проводники в электрическом поле . . . . .	160
3.1.8. Диэлектрики в электрическом поле . . . . .	161
3.1.9. Электрическая емкость конденсатора . . . . .	162
3.1.10. Параллельное и последовательное соединение конденсаторов . . . . .	163
3.1.11. Энергия поля конденсатора . . . . .	163
• <b>Примеры заданий ЕГЭ по теме 3.1</b> «Электрическое поле» . . . . .	164
<b>3.2. Законы постоянного тока</b> . . . . .	166
3.2.1. Сила тока . . . . .	166
3.2.2. Условия существования электрического тока . . . . .	166
3.2.3. Закон Ома для участка цепи . . . . .	167

3.2.4. Электрическое сопротивление . . . . .	168	3.5.3. Вынужденные электромагнитные колебания. Резонанс . . . . .	204
3.2.5. Электродвижущая сила. Внутреннее сопротивление источника тока . . . . .	169	3.5.4. Переменный ток . . . . .	205
3.2.6. Закон Ома для полной электрической цепи . . .	170	3.5.5. Электромагнитное поле. Электромагнитные волны . . . . .	212
3.2.7. Параллельное и последовательное соединение проводников . . . . .	171	3.5.6. Шкала электромагнитных волн . . . . .	214
3.2.8. Работа электрического тока. Закон Джоуля-Ленца . . . . .	172	• <b>Примеры заданий ЕГЭ по теме 3.5</b> «Электромагнитные колебания и волны» . . . . .	220
3.2.9. Мощность электрического тока . . . . .	173	<b>3.6. Оптика . . . . .</b>	222
3.2.10. Свободные носители электрического заряда в металлах, жидкостях и газах. Полупроводники . . . . .	174	3.6.1. Прямолинейное распространение света в однородной среде . . . . .	222
• <b>Примеры заданий ЕГЭ по теме 3.2</b> «Законы постоянного тока» . . . . .	180	3.6.2. Закон отражения света . . . . .	225
<b>3.3. Магнитное поле . . . . .</b>	182	3.6.3. Построение изображений в плоском зеркале. .	227
3.3.1. Магнитное поле. Взаимодействие магнитов . .	182	3.6.4. Закон преломления света . . . . .	228
3.3.2. Опыты Эрстеда и Ампера. Индукция магнитного поля . . . . .	184	3.6.5. Полное внутреннее отражение . . . . .	230
3.3.3. Сила Ампера . . . . .	189	3.6.6. Линзы. Фокусное расстояние и оптическая сила линзы . . . . .	231
3.3.4. Сила Лоренца . . . . .	189	3.6.7. Построение изображений в линзах . . . . .	233
• <b>Примеры заданий ЕГЭ по теме 3.3</b> «Магнитное поле» . . . . .	192	3.6.8. Формула тонкой линзы . . . . .	234
<b>3.4. Электромагнитная индукция . . . . .</b>	194	3.6.9. Фотоаппарат как оптический прибор. Глаз как оптическая система . . . . .	235
3.4.1. Магнитный поток . . . . .	194	3.6.10. Интерференция света . . . . .	236
3.4.2. Явление электромагнитной индукции . . . . .	194	3.6.11. Дифракция света . . . . .	238
3.4.3. Закон электромагнитной индукции Фарадея . .	195	3.6.12. Дисперсия света . . . . .	241
3.4.4. ЭДС индукции в движущихся проводниках . .	197	• <b>Примеры заданий ЕГЭ по теме 3.6 «Оптика» . . . . .</b>	242
3.4.5. Правило Ленца . . . . .	197	• <b>Тренировочный тест к разделу 3</b> «Электродинамика» . . . . .	244
3.4.6. Самоиндукция. Индуктивность . . . . .	198	<b>Раздел 4</b> <b>ОСНОВЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ</b>	
3.4.7. Энергия магнитного поля . . . . .	199	4.1. Постулаты СТО и его следствия . . . . .	250
• <b>Примеры заданий ЕГЭ по теме 3.4</b> «Электромагнитная индукция» . . . . .	200	4.2. Энергия и импульс свободной частицы . . . . .	251
<b>3.5. Электромагнитные колебания и волны. . . . .</b>	202	4.3. Основные уравнения релятивистской механики. Связь массы и энергии . . . . .	253
3.5.1. Свободные электромагнитные колебания в колебательном контуре . . . . .	202	• <b>Примеры заданий ЕГЭ по темам 4.1-4.3</b> «Основы специальной теории относительности» . .	254
3.5.2. Закон сохранения энергии в колебательном контуре . . . . .	204		

## Раздел 5 КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

5.1. Корпускулярно-волновой дуализм .....	256
5.1.1. Гипотеза Планка о квантах .....	256
5.1.2. Фотоны. Энергия и импульс фотона .....	256
5.1.3. Фотоэффект .....	257
5.1.4. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта .....	258
5.1.5. Корпускулярно-волновой дуализм. Волны де Бройля .....	258
• Примеры заданий ЕГЭ по теме 5.1 «Корпускулярно-волновой дуализм» .....	260
5.2. Физика атома .....	262
5.2.1. Планетарная модель атома .....	262
5.2.2. Постулаты Бора .....	263
5.2.3. Оптические спектры .....	264
5.2.4. Лазер .....	267
• Примеры заданий ЕГЭ по теме 5.2 «Физика атома» .....	270
5.3. Физика атомного ядра .....	272
5.3.1. Состав ядра. Нуклонная модель Гейзенберга–Иваненко .....	272
5.3.2. Энергия связи нуклонов в ядре. Ядерные силы .....	273

5.3.3. Дефект массы .....	274
5.3.4. Радиоактивность .....	275
5.3.5. Закон радиоактивного распада. Период полураспада .....	276
5.3.6. Ядерные реакции. Деление и синтез ядер .....	278

- Примеры заданий ЕГЭ по теме 5.3  
  «Физика атомного ядра» .....
- Тренировочный тест  
  к разделам 4 «Основы специальной  
  теории относительности»  
  и 5 «Квантовая физика» .....

### Справочный материал 292

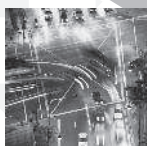
- Ответы к примерам заданий ЕГЭ  
  и тренировочным тестам .....
- Ответы к тренировочному тесту к разделу 1. ....
- Ответы к тренировочному тесту к разделу 2. ....
- Ответы к тренировочному тесту к разделу 3. ....
- Ответы к тренировочному тесту  
  к разделам 4 и 5 .....

---

# ФИЗИКА

---

Теоретический курс с примерами заданий ЕГЭ



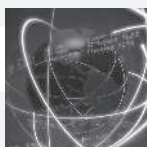
Механика



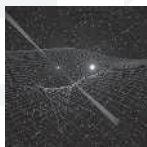
Молекулярная физика.  
Термодинамика



Электродинамика



Основы специальной  
теории относительности



Квантовая физика



Справочный материал





## Раздел 1

# Механика

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

Под механикой обычно понимают так называемую **классическую механику**, в основе которой лежат *законы механики Ньютона*. Механика Ньютона изучает движение любых материальных тел (кроме элементарных частиц) при условии, что эти тела движутся со скоростями, намного меньшими скорости света (движение тел со скоростями порядка скорости света рассматривают в теории относительности, а внутриатомные явления и движение элементарных частиц — в квантовой механике).

В механике рассматривают взаимодействия тел, результатом которых являются изменения скоростей точек этих тел или их деформации. Например, притяжение тел по закону всемирного тяготения, взаимное давление соприкасающихся тел, воздействие частиц жидкости или газа друг на друга и на движущиеся или покоящиеся в них тела и т. п.

При изучении движения материальных тел оперируют рядом понятий, которые отражают те или иные свойства реальных тел, например:

- **материальная точка** — объект пренебрежимо малых размеров, имеющий массу. Это понятие можно использовать, когда тело движется поступательно или когда в изучаемом движении можно пренебречь вращением тела вокруг его центра масс;
- **абсолютно твердое тело** — тело, расстояние между двумя любыми точками которого не меняется. Это понятие применимо, когда можно пренебречь деформацией тела;
- **сплошная изменяемая среда** — это понятие применимо, когда можно пренебречь молекулярной структурой тела. Его используют при изучении движения жидкостей, газов, деформируемых твердых тел.

**Механика** состоит из следующих разделов:

- 1) механика материальной точки;
- 2) механика абсолютно твердого тела;
- 3) механика сплошной среды, в которую, в свою очередь, входят:
  - а) теория упругости;
  - б) теория пластичности;
  - в) гидродинамика;
  - г) аэродинамика;
  - д) газовая динамика.

Каждый из перечисленных разделов состоит из статики, динамики и кинематики.

*Статика* — это учение о равновесии тел под действием сил (греч. *statos* — стоящий).

*Динамика* — это учение о движении тел под действием сил.

*Кинематика* — это учение о геометрических свойствах движения тел.

Кроме перечисленных выше разделов, механики имеют самостоятельное значение теория колебаний, теория устойчивости движения, механика тел переменной массы, теория автоматического регулирования, теория удара и др.

Механика тесно связана с другими разделами физики. Большое значение механика имеет для многих разделов астрономии, особенно для небесной механики (движение планет и звезд и т. д.).

Для техники механика имеет особое значение. Например, гидродинамика, аэродинамика, динамика машин и механизмов, теория движения наземных, воздушных и транспортных средств используют уравнения и методы теоретической механики.

## 1.1. Кинематика

**Кинематика (греч. *kinematos* — движение) — раздел механики, в котором изучаются геометрические свойства движения тел без учета их массы и действующих на них сил.**

Другими словами, в кинематике дается описание того, как движутся тела (по каким *траекториям*, с какими *скоростями* и *ускорениями*) без выяснения причин, почему они так движутся.

Кинематика как раздел механики существует для изучения движения:

- точки и твердого тела, не поддающегося деформации;
- твердого тела, поддающегося упругой или пластической деформации;
- жидкости;
- газа.

Основные задачи кинематики точки и твердого тела:

- 1) Описание движений, совершаемых точками по отношению к выбранной системе отсчета, с помощью уравнений, таблиц или графиков. Описать движение точки — значит определить положение точки в любой момент времени (или определить так называемые законы движения).
- 2) Определение кинематических характеристик движения. Кинематическими характеристиками движения точки являются ее скорость и ускорение.
- 3) Изучение сложных (составных) движений и определение зависимости между характеристиками этих движений. Под сложным движением понимают движение тела относительно системы координат, которая сама движется относительно другой, неподвижной системы координат.

### 1.1.1. Механическое движение. Относительность механического движения. Система отсчета

**Под механическим движением понимают изменение с течением времени взаимного расположения тел или их частей в пространстве:** например, движение небесных тел, колебания земной коры, воздушные и морские течения, движение летательных аппаратов и транспортных средств, машин и механизмов, деформации элементов конструкций и сооружений, движение жидкостей и газов и др.

Относительность механического движения

С относительностью механического движения мы знакомы с детства. Так, сидя в поезде и наблюдая за трогаящимся с места поездом, стоявшим до этого на параллельном пути, мы часто не можем определить, какой из поездов на самом деле начал двигаться. И здесь сразу следует уточнить: двигаться относительно чего? Относительно Земли, конечно. Потому что относительно соседнего поезда мы начали двигаться независимо от того, какой из поездов начал свое движение относительно Земли.

Относительность механического движения заключается в относительности скоростей перемещения тел: скорости тел относительно разных систем отсчета будут различны (скорость человека, перемещающегося в поезде, пароходе, самолете, будет отличаться как по величине, так и по направлению,

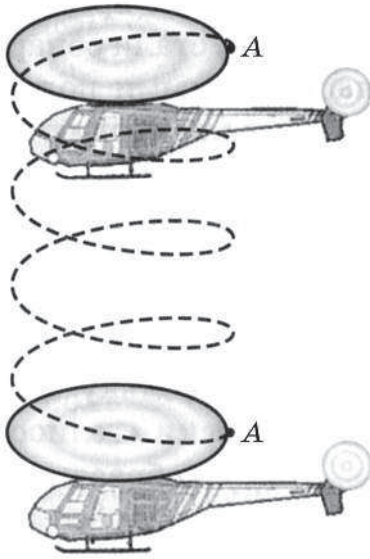


Рис. 1.1

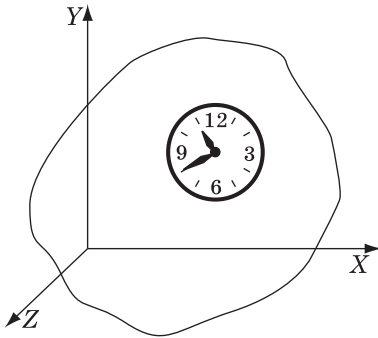


Рис. 1.2

в зависимости от того, в какой системе отсчета эти скорости определяются: в системе отсчета, связанной с движущимся транспортным средством, или с неподвижной Землей).

Различными будут и траектории движения тела в разных системах отсчета. Так, например, вертикально падающие на землю капли дождя оставляют след в виде косых струй на окне вагона мчащегося поезда. Точно также любая точка на вращающемся пропеллере летящего самолета или спускающегося на землю вертолета описывает окружность относительно самолета и гораздо более сложную кривую — винтовую линию относительно Земли, рис. 1.1. Таким образом, при механическом движении относительной является также и траектория движения.

Путь, пройденный телом, также зависит от системы отсчета. Возвращаясь все к тому же пассажиру, сидящему в поезде, мы понимаем, что путь, проделанный им относительно поезда за время поездки, равен нулю (если он не передвигался по вагону) или, во всяком случае, намного меньше того пути, который он преодолел вместе с поездом относительно Земли. Таким образом, при механическом движении относительным является также и путь.

Осознание относительности механического движения (т. е. того, что движение тела можно рассматривать в разных системах отсчета) привело к переходу от геоцентрической системы мира Птолемея к гелиоцентрической системе Коперника. Птолемей, следуя наблюдаемому издревле движению Солнца и звезд на небосклоне, в центре Вселенной расположил неподвижную Землю с вращающимися вокруг нее остальными небесными телами. Коперник же считал, что Земля и другие планеты вращаются вокруг Солнца и одновременно вокруг своих осей.

Таким образом, изменение системы отсчета (Земля — в геоцентрической системе мира и Солнце — в гелиоцентрической) привело к гораздо более прогрессивной гелиоцентрической системе, позволяющей решить многие научные и прикладные задачи астрономии

и изменить взгляды человечества на Вселенную.

Система координат  $X, Y, Z$ , тело отсчета, с которым она связана, и прибор для измерения времени (часы) образуют систему отсчета, относительно которой рассматривается движение тела (рис. 1.2).

*Телом отсчета* называется тело, относительно которого рассматривается изменение положения других тел в пространстве.

Систему отсчета можно выбрать произвольно. При кинематических исследованиях все системы отсчета равноправны. В задачах динамики также можно использовать любые произвольно движущиеся системы отсчета, но удобнее всего инерциальные системы отсчета, так как в них характеристики движения имеют более простой вид.

### 1.1.2. Материальная точка

**Материальная точка** — объект пренебрежимо малых размеров, имеющий массу.

Понятие «материальная точка» вводится для описания (с помощью математических формул) механического движения тел. Делается это потому, что описывать движение точки проще, чем реального



тела, частицы которого к тому же могут двигаться с разными скоростями (например, при вращении тела или деформациях).

Если реальное тело заменяют материальной точкой, то этой точке приписывают массу этого тела, но пренебрегают его размерами, а заодно пренебрегают различием характеристик движения его точек (скоростей, ускорений и т. д.), если таковое имеется. В каких случаях это можно делать?

Практически любое тело можно рассматривать как материальную точку, если расстояния, проходимые точками тела, очень велики по сравнению с его размерами.

Например, материальными точками считают Землю и другие планеты при изучении их движения вокруг Солнца. В данном случае различия в движении различных точек любой планеты, вызванные ее суточным вращением, не влияют на величины, описывающие годовое движение.

Следовательно, если в изучаемом движении тела можно пренебречь его вращением вокруг оси, такое тело можно представить как материальную точку.

Однако при решении задач, связанных с суточным вращением планет (например, при определении восхода Солнца в разных местах поверхности земного шара), считать планету материальной точкой бессмысленно, так как результат задачи зависит от размеров этой планеты и скорости движения точек ее поверхности.

Материальной точкой правомерно считать самолет, если требуется, например, определить среднюю скорость его движения на пути из Москвы в Новосибирск. Но при вычислении силы сопротивления воздуха, действующей на летящий самолет, считать его материальной точкой нельзя, поскольку сила сопротивления зависит от размеров и формы самолета.

Если тело движется поступательно, даже если его размеры сопоставимы с расстояниями, которые оно проходит, это тело можно рассматривать как материальную точку (поскольку все точки тела движутся одинаково).

В заключение можно сказать: тело, размерами которого в условиях рассматриваемой задачи можно пренебречь, можно считать материальной точкой.

#### Траектория

**Траектория — это линия (или, как принято говорить, кривая), которую описывает тело при движении относительно выбранного тела отсчета.**

Говорить о траектории имеет смысл лишь в том случае, когда тело можно представить в виде материальной точки.

Траектории могут иметь разную форму. О форме траектории иногда удается судить по видимому следу, который оставляет движущееся тело, например, летящий самолет или проносящийся в ночном небе метеор.

Форма траектории зависит от выбора тела отсчета. Например, относительно Земли траектория движения Луны представляет собой окружность, относительно Солнца — линию более сложной формы (рис. 1.3).

При изучении механического движения в качестве тела отсчета, как правило, рассматривается Земля.

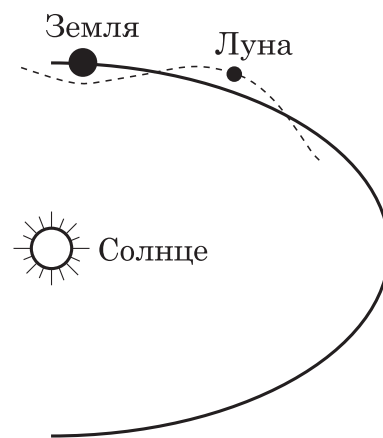


Рис. 1.3

#### Способы задания положения точки и описание ее движения

Положение точки в пространстве задается двумя способами: 1) с помощью координат; 2) с помощью радиус-вектора.

Положение точки с помощью координат задается тремя проекциями точки  $x$ ,  $y$ ,  $z$  на оси декартовой системы координат  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$ , связанные с телом отсчета (рис. 1.4). Для этого из точки  $A$  необходимо опустить перпендикуляры на плоскости  $YZ$  (координата  $x$ ),  $XZ$  (координата  $y$ ),  $XY$  (координата  $z$ )

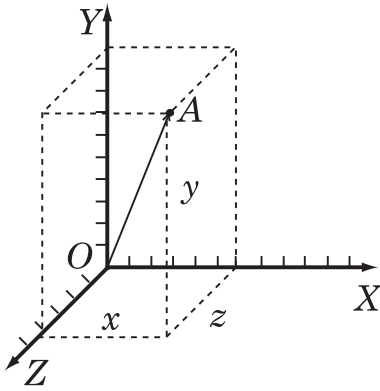


Рис. 1.4

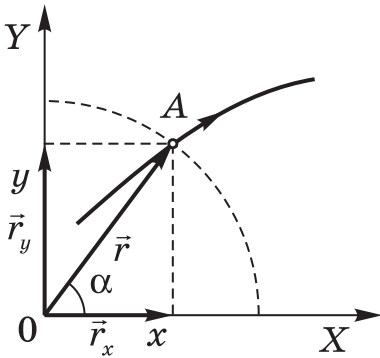


Рис. 1.5

соответственно. Записывается это так:  $A(x, y, z)$ . Для конкретного случая, изображенного на рис. 1.4 ( $x = 6, y = 10, z = 4,5$ ), точка  $A$  обозначается  $A(6; 10; 4,5)$ .

Наоборот, если заданы конкретные значения координат точки в данной системе координат, то для изображения самой точки необходимо отложить значения координат на соответствующие оси ( $x$  на ось  $OX$  и т. д.) и на этих трех взаимно перпендикулярных отрезках построить параллелепипед. Вершина его, противоположная началу координат  $O$  и лежащая на диагонали параллелепипеда, и будет искомой точкой  $A$ .

Если точка движется в пределах некоторой плоскости, то через выбранные на теле отсчета точки достаточно провести две координатные оси:  $OX$  и  $OY$ . Тогда положение точки на плоскости определяют двумя координатами  $x$  и  $y$  (рис. 1.5).

Если точка движется вдоль прямой, достаточно задать одну координатную ось  $OX$  и направить ее вдоль линии движения.

Задание положения точки  $A$  с помощью радиус-вектора осуществляется соединением точки  $A$  с началом координат  $O$  (рис. 1.5). Направленный отрезок  $OA = \vec{r}$  называется радиус-вектором.

*Радиус-вектор* — это вектор, соединяющий начало отсчета с положением точки в произвольный момент времени.

Точка задана радиус-вектором, если известны его длина (модуль) и направление в пространстве, т. е. значения его проекций  $r_x, r_y, r_z$  на оси координат  $OX, OY, OZ$ , либо углы между радиус-вектором и осями координат. Для случая движения на плоскости (рис. 1.5) имеем:

$$\begin{aligned} x &= r_x = r \cos \alpha, \\ y &= r_y = r \sin \alpha. \end{aligned}$$

Здесь  $r = |\vec{r}|$  — модуль радиус-вектора  $\vec{r}$ ,  $r_x$  и  $r_y$  — его проекции на оси координат, все три величины — скаляры;  $x$  и  $y$  — координаты точки  $A$ .

Последние уравнения демонстрируют связь между координатным и векторным способами задания положения точки.

Вектор  $\vec{r}$  можно также разложить на составляющие по осям  $X$  и  $Y$ , т. е. представить в виде суммы двух векторов (рис. 1.5):

$$\vec{r} = \vec{r}_x + \vec{r}_y.$$

Таким образом, положение точки в пространстве задается либо ее координатами, либо радиус-вектором.

#### Способы описания движения точки

В соответствии со способами задания координат движение точки можно описать: 1) координатным способом; 2) векторным способом.

При координатном способе описания (или задания) движения изменение координат точки со временем записывается в виде функций всех трех ее координат от времени:

$$\begin{aligned} x &= x(t), \\ y &= y(t), \\ z &= z(t). \end{aligned} \tag{1.1}$$

Уравнения (1.1) называют кинематическими уравнениями движения точки, записанными в координатной форме. Зная кинематические уравнения движения и начальные условия (т. е. положение точки в начальный момент времени), можно определить положение точки в любой момент времени.

При векторном способе описания движения точки изменение ее положения со временем задается зависимостью радиус-вектора от времени:

$$\vec{r} = \vec{r}(t). \quad (1.2)$$

Уравнение (1.2) представляет собой уравнение движения точки, записанное в векторной форме. Если оно известно, то для любого момента времени можно рассчитать радиус-вектор точки, т. е. определить ее положение (как и в случае координатного способа). Таким образом, задание трех скалярных уравнений (1.1) равносильно заданию одного векторного уравнения (1.2).

Для каждого случая движения вид уравнений (1.1) или (1.2) будет вполне определенным. Если траекторией движения точки является прямая линия, движение называется *прямолинейным*, а если кривая — *криволинейным*.

Перемещение и путь

**Перемещение в механике — это вектор, соединяющий положения движущейся точки в начале и в конце некоторого промежутка времени.**

Понятие вектора перемещения вводится для решения задачи кинематики — определить положение тела (точки) в пространстве в данный момент времени, если известно его начальное положение.

На рис. 1.5 вектор  $\overline{M_1M_2}$  соединяет два положения движущейся точки —  $M_1$  и  $M_2$  в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$  соответственно и, согласно определению, является вектором перемещения. Если точка  $M_1$  задана радиус-вектором  $\vec{r}_1$ , а точка  $M_2$  — радиус-вектором  $\vec{r}_2$ , то, как видно из рисунка, вектор перемещения равен разности этих двух векторов, т. е. изменению радиус-вектора за время  $\Delta t = t_2 - t_1$ :

$$\Delta \vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1.$$

Сложение перемещений (например, на двух соседних участках траектории)  $\Delta \vec{r}_1$  и  $\Delta \vec{r}_2$  осуществляется по правилу сложения векторов:

$$\Delta r = \Delta \vec{r}_2 + \Delta \vec{r}_1.$$

**Путь — это длина участка траектории, пройденного материальной точкой за данный промежуток времени.** Модуль вектора перемещения в общем случае не равен длине пути, пройденного точкой за время  $\Delta t$  (траектория может быть криволинейной, и, кроме того, точка может менять направление движения).

Модуль вектора перемещения равен пути только при прямолинейном движении в одном направлении. Если направление прямолинейного движения меняется, модуль вектора перемещения меньше пути.

При криволинейном движении модуль вектора перемещения также меньше пути, т. к. хорда всегда меньше длины дуги, которую она стягивает (рис. 1.6).

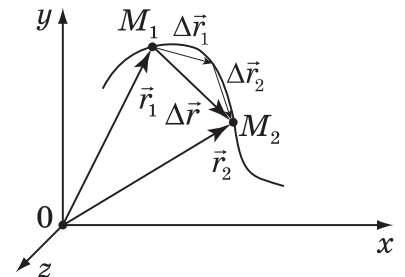


Рис. 1.6

### 1.1.3. Скорость материальной точки

Скорость характеризует быстроту, с которой происходят любые изменения в окружающем нас мире (движение материи в пространстве и времени). Движение пешехода по тротуару, полет птицы, распространение звука, радиоволн или света в воздухе, вытекание воды из трубы, движение облаков, испарение воды, нагрев утюга — все эти явления характеризуются определенной скоростью.

При механическом движении тел скорость характеризует не только быстроту, но и направление движения, т. е. является *векторной величиной*.

**Скоростью  $\vec{v}$  точки называется предел отношения перемещения  $\Delta\vec{r}$  к промежутку времени  $\Delta t$ , в течение которого это перемещение произошло, при стремлении  $\Delta t$  к нулю (т. е. производной  $\Delta\vec{r}$  по  $t$ ):**

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} = \vec{r}'_t. \quad (1.3)$$

Составляющие вектора скорости по осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  определяются аналогично:

$$\vec{v}_x = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = x'; \quad v_y = y'; \quad v_z = z'. \quad (1.4)$$



Рис. 1.7

Определенное таким образом понятие скорости называют также **мгновенной скоростью**. Это определение скорости справедливо для любых видов движения — от *криволинейного неравномерного* до *прямолинейного равномерного*. Когда говорят о скорости при неравномерном движении, под ней понимают именно мгновенную скорость. Из этого определения непосредственно вытекает векторный характер скорости, поскольку *перемещение* — векторная величина. Вектор мгновенной скорости  $\vec{v}$  всегда направлен по касательной к траектории движения. Он указывает направление, по которому происходило бы движение тела, если бы с момента времени  $t$  на него прекратилось действие любых других тел (рис. 1.7).

#### Средняя скорость

Средняя скорость точки вводится для характеристики неравномерного движения (т.е. движения с переменной скоростью) и определяется двояко.

1. Средняя скорость точки  $v_{cp}$  равна отношению всего пройденного телом пути  $\Delta s$  ко всему времени движения  $\Delta t$ :

$$\vec{v}_{cp} = \frac{\Delta s}{\Delta t}. \quad (1.5)$$

При таком определении средняя скорость — скаляр, т. к. пройденный путь (расстояние) и время — величины скалярные.

Такой способ определения дает представление о *средней скорости движения на участке траектории (средней путевой скорости)*.

2. Средняя скорость точки равна отношению перемещения точки к промежутку времени, в течение которого это перемещение произошло:

$$\vec{v}_{cp} = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}. \quad (1.6)$$

Средняя скорость перемещения — величина *векторная*.

Для неравномерного криволинейного движения такое определение средней скорости не всегда позволяет определить даже приблизительно реальные скорости на пути движения точки. Например, если точка двигалась по замкнутой траектории в течение некоторого времени (рис. 1.8), то перемещение

ее равно нулю (но скорость явно отличалась от нуля). В этом случае лучше пользоваться первым определением средней скорости.

В любом случае следует различать эти два определения средней скорости и знать, о какой из них идет речь.

### Закон сложения скоростей

Закон сложения скоростей устанавливает связь между значениями скорости материальной точки относительно различных систем отсчета, движущихся друг относительно друга. В нерелятивистской (классической) физике, когда рассматриваемые скорости малы по сравнению со скоростью света, справедлив закон сложения скоростей Галилея, который выражается формулой:

$$\vec{v}_2 = \vec{v}_1 + \vec{v}, \quad (1.7)$$

где  $\vec{v}_2$  и  $\vec{v}_1$  — скорости тела (точки) относительно двух инерциальных систем отсчета — неподвижной системы отсчета  $K_2$  и системы отсчета  $K_1$ , движущейся со скоростью  $\vec{v}$  относительно  $K_2$ .

Формула (1.3) может быть получена путем сложения векторов перемещений.

Для наглядности рассмотрим движение лодки со скоростью  $\vec{v}_1$  относительно реки (система отсчета  $K_1$ ), воды которой движутся со скоростью  $\vec{v}$  относительно берега (система отсчета  $K_2$ ) (рис. 1.9). Векторы перемещений лодки относительно воды  $\Delta\vec{r}_1$ , реки относительно берега  $\Delta\vec{r}$  и суммарный вектор перемещения лодки относительно берега  $\Delta\vec{r}_2$  изображены на рис. 1.10. Математически:

$$\Delta\vec{r}_2 = \Delta\vec{r}_1 + \Delta\vec{r}. \quad (1.8)$$

Поделив обе части уравнения (1.8) на интервал времени  $\Delta t$ , получим:

$$\frac{\Delta\vec{r}_2}{\Delta t} = \frac{\Delta\vec{r}_1}{\Delta t} + \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t},$$

что равносильно уравнению (1.7). В проекциях вектора скорости на оси координат уравнение (1.7) имеет вид:

$$\begin{aligned} u_{2x} &= v_{1x} + v_x, \\ u_{2y} &= v_{1y} + v_y. \end{aligned} \quad (1.9)$$

Проекции скоростей складываются алгебраически.

### Относительная скорость

Из закона сложения скоростей следует, что если два тела движутся в одной и той же системе отсчета со скоростями  $\vec{v}_1$  и  $\vec{v}_2$ , то скорость первого тела относительно второго  $\vec{v}_{12}$  равна разности скоростей этих тел:

$$\vec{v}_{12} = \vec{v}_1 - \vec{v}_2. \quad (1.10)$$

Так, при движении тел в одном направлении (обгон) модуль относительной скорости равен разности скоростей, а при встречном движении — сумме скоростей.

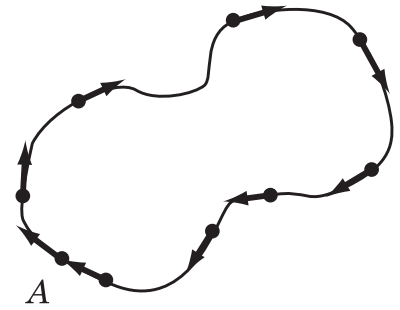


Рис. 1.8

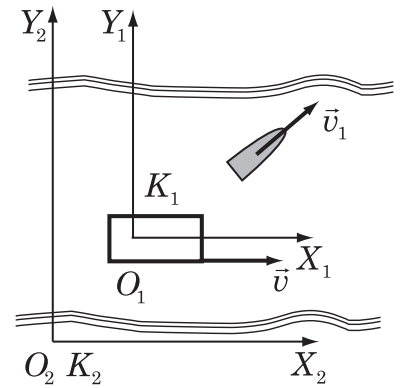


Рис. 1.9

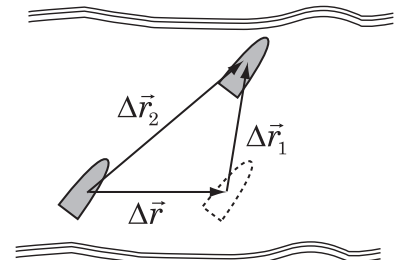


Рис. 1.10

### 1.1.4. Ускорение материальной точки

Ускорение — величина, характеризующая быстроту изменения скорости. Как правило, движение является неравномерным, т. е. происходит с переменной скоростью. На одних участках траектории тела могут иметь большую скорость, на других — меньшую. Например, поезд, отходящий от станции, со временем движется все быстрее и быстрее. Подъезжая к станции, он, наоборот, замедляет свое движение.

**Ускорение (или мгновенное ускорение) — векторная физическая величина, равная пределу отношения изменения скорости к промежутку времени, за который это изменение произошло, при стремлении  $\Delta t$  к нулю, (т. е. производной  $\vec{v}$  по  $t$ ):**

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \vec{v}' \quad (1.11)$$

Составляющие  $\vec{a}$  ( $a_x, a_y, a_z$ ) равны соответственно:

$$a_x = v'_x; \quad a_y = v'_y; \quad a_z = v'_z. \quad (1.12)$$

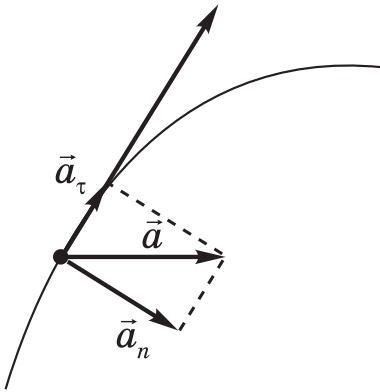


Рис. 1.11

Ускорение, как и изменение скорости, направлено в сторону вогнутости траектории и может быть разложено на две составляющие — *тангенциальную* — по касательной к траектории движения — и *нормальную* — перпендикулярно к траектории (рис. 1.11).

В соответствии с этим проекцию ускорения  $a_t$  на касательную к траектории называют *касательным*, или *тангенциальным ускорением*, проекцию  $a_n$  на нормаль — *нормальным*, или *центростремительным ускорением*.

Касательное ускорение определяет величину изменения численного значения скорости:

$$a_t = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t}. \quad (1.13)$$

Нормальное, или центростремительное ускорение характеризует изменение направления скорости и определяется по формуле:

$$a_n = \frac{v^2}{R}, \quad (1.14)$$

где  $R$  — радиус кривизны траектории в соответствующей ее точке. Вывод этой формулы приведен в 1.1.8.

Модуль ускорения определяется по формуле:

$$a = \sqrt{a_t^2 + a_n^2}. \quad (1.15)$$

При прямолинейном движении полное ускорение  $a$  равно тангенциальному  $a = a_t$ , т. к. центростремительное  $a_n = 0$ .

Единицей ускорения в СИ является такое ускорение, при котором за каждую секунду скорость тела изменяется на 1 м/с. Эту единицу обозначают 1 м/с<sup>2</sup> и называют «метр на секунду в квадрате».

### 1.1.5. Равномерное прямолинейное движение

**Движение точки называется равномерным, если за любые равные промежутки времени она проходит равные пути.**

Например, если автомобиль за каждую четверть часа (15 мин) проходит 20 км, за каждые полчаса (30 мин) — 40 км, за каждый час (60 мин) — 80 км и т. д., то такое движение считается равномерным.

При равномерном движении численная величина (модуль) скорости точки  $v$  — величина постоянная:

$$v = |\vec{v}| = \text{const.}$$

Равномерное движение может происходить как по криволинейной, так и по прямолинейной траектории.

Закон равномерного движения точки описывается уравнением:

$$s = s_0 + vt, \quad (1.16)$$

где  $s$  — расстояние, измеренное вдоль дуги траектории, от некоторой точки на траектории, принятой за начало отсчета;  $t$  — время точки в пути;  $s_0$  — значение  $s$  в начальный момент времени  $t = 0$ .

Путь, пройденный точкой за время  $t$ , в (1.5) определяется слагаемым  $vt$ .

**Равномерное прямолинейное движение** — это движение, при котором тело перемещается с постоянной по модулю и направлению скоростью:

$$\vec{v} = \text{const.}$$

Скорость равномерного прямолинейного движения — величина постоянная и может быть определена как отношение перемещения точки к промежутку времени, в течение которого это перемещение произошло:

$$\vec{v} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}. \quad (1.17)$$

Модуль этой скорости

$$v = \frac{|\Delta \vec{r}|}{\Delta t}$$

по смыслу есть расстояние  $s = |\Delta r|$ , пройденное точкой за время  $\Delta t$ .

**Скорость тела при равномерном прямолинейном движении** — это величина, равная отношению пути  $s$  ко времени, за которое этот путь пройден:

$$v = \frac{s}{t}. \quad (1.18)$$

Перемещение при прямолинейном равномерном движении (по оси  $X$ ) можно рассчитать по формуле:

$$\Delta x = v_x t,$$

где  $v_x$  — проекция скорости на ось  $X$ . Отсюда закон прямолинейного равномерного движения имеет вид:

$$x = x_0 + v_x t. \quad (1.19)$$

Если в начальный момент времени  $x_0 = 0$ , то

$$x = v_x t. \quad (1.20)$$