

# ФИЗИКА

УЧЕБНИК

10





## AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASININ DÖVLƏT HİMNİ

*Musiqisi Üzeyir Hacıbəylinin,  
sözləri Əhməd Cavadındır.*

Azərbaycan! Azərbaycan!  
Ey qəhrəman övladın şanlı Vətəni!  
Səndən ötrü can verməyə cümlə hazırız!  
Səndən ötrü qan tökməyə cümlə qadırız!  
Üçrəngli bayrağınla məsud yaşa!  
Minlərlə can qurban oldu!  
Sinən hər bə meydan oldu!  
Hüququndan keçən əsgər,  
Hərə bir qəhrəman oldu!

Sən olasan gülüstan,  
Sənə hər an can qurban!  
Sənə min bir məhəbbət  
Sinəmdə tutmuş məkan!

Namusunu hifz etməyə,  
Bayrağını yüksəltməyə  
Cümlə gənclər müştəqdir!  
Şanlı Vətən! Şanlı Vətən!  
Azərbaycan! Azərbaycan!

LAYIHƏ



**ГЕЙДАР АЛИЕВ**  
**ОБЩЕНАЦИОНАЛЬНЫЙ ЛИДЕР**  
**АЗЕРБАЙДЖАНСКОГО НАРОДА**

LAYIHE

LAYIHƏ



МИРЗАЛИ МУРГУЗОВ, РАСИМ АБДУРАЗАГОВ, РОВШАН АЛИЕВ

# ФИЗИКА

## 10

УЧЕБНИК

по предмету Физика для 10-х классов общеобразовательных заведений

©Azərbaycan Respublikası Təhsil Nazirliyi



**Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0  
International (CC BY-NC-SA 4.0)**

Bu nəşr Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International  
lisensiyası (CC BY-NC-SA 4.0) ilə [www.trims.edu.az](http://www.trims.edu.az)  
saytında əlçatandır. Bu nəşrin məzmunundan istifadə edərkən  
sözügedən lisensiyanın şərtlərini qəbul etmiş olursunuz:

İstinad zamanı nəşrin müəllif(lər)inin adı göstərilməlidir.

Nəşrdən kommersiya məqsədilə istifadə qadağandır.

Törəmə nəşrlər orijinal nəşrin lisensiya şərtlərilə yayılmalıdır.

Замечания и предложения, связанные с этим изданием,  
просим отправлять на электронные адреса:  
**bn@bakineshr.az** и **derslik@edu.gov.az**  
Заранее благодарим за сотрудничество!

В А К И



Н Ə Ş R

LAYIHƏ



# ФИЗИКА

## Оглавление

### глава I

#### • ОСНОВЫ КИНЕМАТИКИ •

1.1. Механическое движение и его описание . . . . .	10
1.2. Путь и перемещение . . . . .	13
1.3. Прямолинейное равномерное движение. Скорость . . . . .	17
1.4. Прямолинейное неравномерное движение. Ускорение. . . . .	20
1.5. Скорость и перемещение при прямолинейном равнопеременном движении . . . . .	24
• ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА. “Правило путей” для равноускоренного движения . . . . .	28
1.6. Свободное падение тела . . . . .	29
1.7. Относительность механического движения . . . . .	32
1.8. Равномерное движение по окружности . . . . .	35
• Задачи к I главе . . . . .	38

### глава II

#### • ОСНОВЫ ДИНАМИКИ •

2.1. Основная задача динамики. Сила. Равнодействующая сила. Масса . . . . .	43
2.2. Движение по инерции: I закон Ньютона . . . . .	46
2.3. Основной закон динамики: II закон Ньютона . . . . .	49
2.4. Действие и противодействие: III закон Ньютона . . . . .	52
2.5. Закон всемирного тяготения . . . . .	54
2.6. Сила тяжести. Напряженность гравитационного поля . . . . .	57
2.7. Вес и невесомость . . . . .	60
2.8. Сила упругости . . . . .	65
2.9. Сила трения. Движение под действием силы трения . . . . .	69
2.10. Условия равновесия тела . . . . .	73
• Задачи к II главе . . . . .	75

### глава III

#### • ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ •

3.1. Замкнутая система. Закон сохранения импульса . . . . .	79
3.2. Механическая работа и мощность . . . . .	84
3.3. Энергия – способность системы совершить работу. Кинетическая энергия . . . . .	86
3.4. Потенциальная энергия . . . . .	89
3.5. Полная механическая энергия. Закон сохранения энергии . . . . .	93
3.6. Использование альтернативных источников энергии в Азербайджане (Урок-презентация) . . . . .	96
• Задачи к III главе . . . . .	97

#### глава IV

### • МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ •

4.1. Колебательное движение. Свободные колебания . . . . .	101
4.2. Гармонические колебания пружинного маятника . . . . .	104
4.3. Гармонические колебания математического маятника . . . . .	108
• ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА. Определение ускорения свободного падения при помощи математического маятника . . . . .	111
4.4. Скорость и ускорение при гармонических колебаниях . . . . .	112
4.5. Превращения энергии при гармонических колебаниях (Урок-презентация) . . . . .	114
4.6. Вынужденные колебания. Резонанс . . . . .	116
4.7. Распространение колебаний в упругой среде: механическая волна . . . . .	118
• Задачи к IV главе . . . . .	122

#### глава V

### • РЕЛЯТИВИСТСКАЯ МЕХАНИКА •

5.1. Основы теории относительности . . . . .	126
5.2. Закон взаимосвязи между энергией и массой . . . . .	130
• Задачи к V главе . . . . .	132

#### глава VI

### • МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ •

6.1. Молекулярно-кинетическая теория и ее основные положения . . . . .	135
6.2. Идеальный газ. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа . . . . .	139
6.3. Тепловое равновесие. Температура . . . . .	142
6.4. Определение скорости движения молекул газа (Урок-презентация) . . . . .	146
6.5. Уравнение состояния идеального газа. . . . .	147
6.6. Газовые законы . . . . .	150
6.7. Свойства паров: насыщенный и ненасыщенный пар . . . . .	154
6.8. Влажность воздуха. Точка росы . . . . .	157
6.9. Поверхностное натяжение жидкости. Капиллярные явления . . . . .	160
6.10. Твердые тела и некоторые их свойства . . . . .	164
• Задачи к VI главе . . . . .	169

#### глава VII

### • ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ •

7.1. Термодинамическая система. Внутренняя энергия . . . . .	173
7.2. Первый закон термодинамики . . . . .	178
7.3. Второй закон термодинамики. Принцип работы тепловых двигателей . . . . .	182
• Проект. "Тепловые двигатели и окружающая среда". . . . .	188
• Задачи к VII главе . . . . .	189

Словарь терминов . . . . .	191
Источники . . . . .	208

## ПОЗНАКОМЬТЕСЬ С УЧЕБНИКОМ!

### Карта понятий.

Систематика понятий, изучаемых в главе (последовательность взаимосвязи).

"Карта понятий" для I главы



### Мотивация.

Описываются различные ситуации, обобщаемые вопросами, основанными на ранее полученных знаниях.

### 3.1 ЗАМКНУТАЯ СИСТЕМА. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА



Барон Мюнхгаузен утверждал, что он как будто бы, вытащил сам себя вместе с лошастью из болота ухватившись за свои волосы.

- Как по-вашему, верно ли утверждение барона Мюнхгаузена и возможно ли это? Почему?
- Мог ли спастись барон Мюнхгаузен из болота таким способом?

### Исследование.

Практические работы. Могут выполняться индивидуально и в группах. Создается связь между ранее изученным и изучаемыми в данный момент материалами.

#### Исследование-1. Странное столкновение шариков

**Оборудование:** желоб Гаштеля, стальные шарики одинаковых размеров (8–10 штук), деревянная опора (или штатив с муфтой и зажимом).

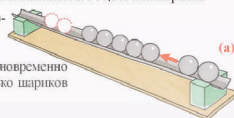
**Ход исследования:**

1. Закрепите желоб на горизонтальной опоре и на нем выполните последовательно цепочку шариков, соприкасающихся друг с другом (а). Один из шариков толкните вдоль желоба. Проследите за явлением, произошедшим после столкновения его с цепочкой шариков.

2. Повторите опыт, толкнув два шарика одновременно вдоль желоба, и проследите за произошедшим явлением.
3. Повторите опыт, толкнув три шарика одновременно вдоль желоба, и обратите внимание сколько шариков отделилось от цепочки шариков.

**Обсуждение результатов:**

- Что наблюдалось при ударе одного шарика по цепочке шариков?
- Сколько, соответственно, отделилось шариков от цепочки при повторении опытов с соударением двумя и тремя шариками?
- Выскажите свое предположение о причине возникновения этих явлений.



### Углубление.

Основные понятия, определения, правила и объяснения, связанные с темой для углубленного изучения.

#### Уравнение волны

Предположим, что источник волны колеблется по гармоническому закону  $x = A \cos \omega t$ . Если колебательное движение распространяется с какой-либо скоростью  $\bar{v}$  в окружающей источник среде, то возникает волна. В результате, волна, через определенный промежуток времени  $\tau$  (tau), достигнет точки на расстоянии  $l$  от источника:

$$\tau = \frac{l}{\bar{v}}$$

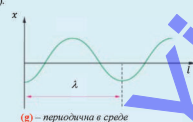
Это значит, что волна, в которой колебания происходят по тому же закону, что и колебания источника, достигнет точки на расстоянии  $l$ , запаздывая на  $\tau$  секунд. Поэтому **уравнение волны**, достигшей произвольной точки на расстоянии  $l$  от источника колебаний, можно записать так:

$$x = A \cos \omega(t - \tau) = A \cos \omega \left( t - \frac{l}{\bar{v}} \right) = A \cos \frac{2\pi}{T} \left( t - \frac{l}{\bar{v}} \right). \quad (4.38)$$

График волны по форме схож с графиком гармонических колебаний, однако это не одно и то же. Так, если график гармонических колебаний показывает изменение по гармоническому закону одной из характеристик колеблющейся точки, например, смещения от времени ( $t$ ), то **график волны** — это картина расположения связанных точек среды в данный момент времени, то есть **гармоничность этой волны в среде** (a).



(b) — периодична по времени



(a) — периодична в среде

## Практическая работа.

Экспериментальная деятельность учащихся по изучаемой теме.

### ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА "ПРАВИЛО ПУТЕЙ" ДЛЯ РАВНОПЕРЕМЕННОГО ДВИЖЕНИЯ

**Цель:** научиться определять правило путей (отношение путей) равноускоренного движения шарика, катящегося по наклонному желобу.  
**Оборудование:** желоб Галилея, шарик, металлический цилиндр (от набора "удельная теплопроводность"), метроном (или секундомер), измерительная лента, штатив с муфтой и зажимом.



**Ход исследования:**  
I этап. Измерение ускорения движения шарика.  
1. Желоб закрепите наклонно в штативе так, чтобы он образовывал с поверхностью

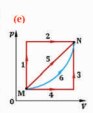
## Применение. Опыты и задания для закрепления, применения и комментирования материала изучаемой темы.

### Исследование-1. Применение. В каком процессе внутренняя энергия меняется гораздо больше?

**Задача:** В термодинамической системе были совершены процессы, представленные на диаграмме  $p - V$  (е). Сравните изменение внутренней энергии и работы, совершаемые системой в процессах перехода из точки М в точку N.

**Обсуждение результатов:**  
• От чего зависит изменение внутренней энергии термодинамической системы?  
• В каком из процессов изменения внутренней энергии системы изменяется гораздо больше? Почему?  
• В каком из процессов работа, совершаемая системой, гораздо больше? Почему?

**Применение и повседневный опыт:**  
Шарик в классной комнате 4 м, длина 10 м, а высота 4 м. Температура воздуха в комнате, при нормальном атмосферном давлении, 20°C.  
• Если воздух в комнате состоит только из одинакового идеального газа, то чему будет



## Применение в повседневной жизни. Экспериментальные задания, для выполнения которых можно использовать различные источники.

### Применение в повседневной жизни:

- Длина секундной стрелки наручных часов 2 см, а длина минутной стрелки 1,5 см. У какой из стрелок модуль центростремительного ускорения больше и на сколько?
- Где в повседневной жизни можно встретить равномерное движение по окружности? Что можно сказать об их периоде и частоте вращения?

### Провести самооценку:

1. Какие понятия повторили на уроке? Что из этого вы хорошо поняли, а что осталось вам не ясным?

• | • Основы кинематики •

37

## Провести самооценку. Задания для определения степени усвоения материала и выявления ваших слабых особенностей. Имеет целью развитие ваших творческих умений и выражение отношения к ним.

**Что вы узнали?** Дается для закрепления пройденного материала.

**Проект.** Подразумевается как домашнее задание. Носит экспериментальный характер и для его выполнения можно использовать различные ресурсы.

**Задачи для глав.** В конце раздела даются вопросы и задания по применению изученного материала.

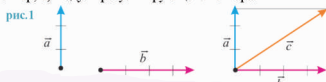
2. Почему ускорение при равномерном движении тела по окружности называется центростремительным или нормальным ускорением?
3. Вычислите модуль центростремительного ускорения Земли, вращающейся вокруг Солнца (радиус орбиты Земли  $R = 1,5 \cdot 10^8$  км).
4. С какой линейной скоростью вращается Земля вокруг Солнца (радиус орбиты Земли  $R = 1,5 \cdot 10^8$  км)?

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Дайте определения нижеприведенных понятий и величин: "угол поворота", "угловая скорость", "линейная скорость", "центростремительное ускорение", "период вращения", "частота вращения".

• ПРОЕКТ • Постройте "КАРТУ ПОНЯТИЙ" равномерного движения по окружности.

Задачи для 1 главы

- 1.1. Определите координаты материальной точки на плоскости XOY: радиус-вектор, модуль которого 5м, образует с осью OX угол 30°.
- 1.2. Координаты материальной точки М равны  $x_M = 1$  м и  $y_M = 1,5$  м, а координаты точки N равны  $x_N = 3$  м и  $y_N = -2$  м. Определите:  
а) модуль вектора, соединяющий точки М и N;  
б) проекции этого вектора на оси OX и OY;  
в) угол между этим вектором и осью OX.
- 1.3. Вектора  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$  взаимно перпендикулярны (рис.1). Определите: а) результирующий вектор; б) модуль результирующего вектора.





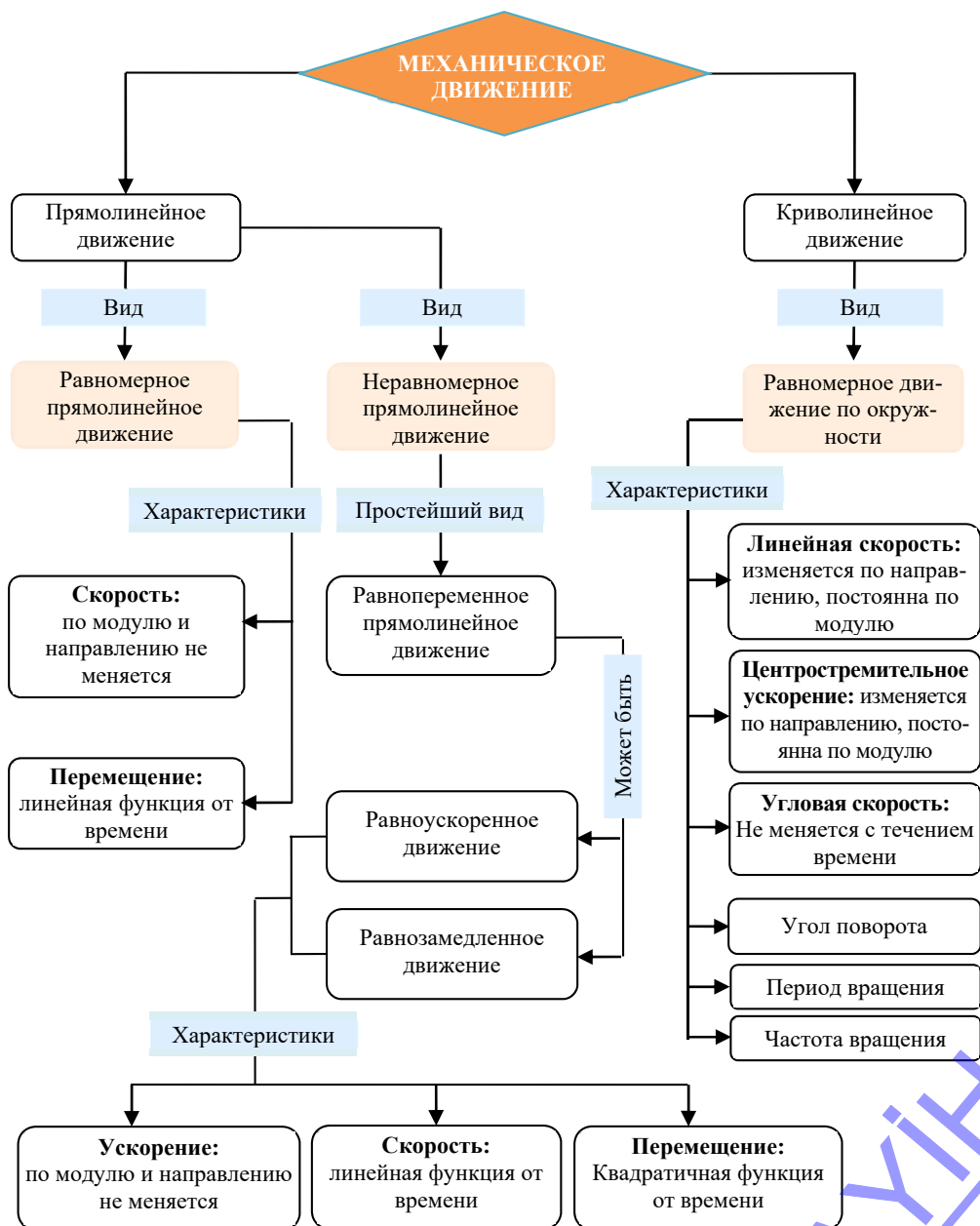
# ОСНОВЫ КИНЕМАТИКИ

Освоив материалы этой главы –  
**ВЫ СУМЕЕТЕ:**

- объяснить разницу: между материальной точкой и телом, путем и перемещением, равномерным и равнопеременным прямолинейными движениями;
- построить и проанализировать графики равномерного и равнопеременного прямолинейных движений;
- объяснить свободное падение и движение тела, брошенного вертикального вверх;
- составить и решить качественные и количественные задачи относящиеся к следующим движениям материальной точки: прямолинейному равномерному, прямолинейному равнопеременному и равномерному движению по окружности;
- построить графики зависимости физических величин, характеризующих прямолинейное равномерное, прямолинейное равнопеременное движения материальной точки и ее равномерное движение по окружности;
- определить экспериментально зависимость между физическими величинами, характеризующими прямолинейное равномерное, прямолинейное равнопеременное и равномерное движения материальной точки по окружности;
- привести примеры механического движения и его видов в повседневной жизни, а также примеры применения и принципы работы устройств, встречаемых вами механизмов.

ЛАЙН

“Карта понятий” для I главы





Вероятно, вы слышали эти знаменитые выражения древнегреческого философа Гераклита Эфесского (554–483 гг. до н.э.): “Все течет, все изменяется”, “Невозможно дважды войти в одну и ту же реку”.

- Каков смысл этих выражений?

При отсутствии друга на месте заранее договоренной встречи вы, сразу позвонив ему по телефону, спрашиваете: “Где ты?”. Друг, представив себе место встречи, просит вас: “Стой на месте, иду”.

- Что вы думаете о физическом смысле выражений “Где ты?” и “Стой на месте”?

### Исследование-1. Остров сокровищ

**Задача 1:** Из романа Р.Стивенсона “Остров сокровищ” вы знаете, что легендарный морской пират капитан Флинт место захоронения сокровищ на острове обозначил на карте следующим образом: “...Высокое дерево на плече Подзорной Трубы. В полдень пройти вдоль тени дерева сто футов, повернув на запад пройти еще десять сажень. Копать девяносто дюймов глубины” (а).

Можете ли вы определить местоположение сокровищ (1 фут = 30,48 см, 1 сажень = 213,36 см, 1 дюйм = 2,5 см)?

#### Обсуждение результатов:

- Можете ли вы, до отбытия на остров, определить по карте место захоронения сокровищ? Что для этого необходимо сделать?



**Движение** является одним из основных свойств непрерывно изменяющейся материи в окружающем нас мире. Самой простой формой движения является **механическое движение**.

- **Механическое движение** – это изменение положения тела относительно других тел в пространстве с течением времени.
- Наука, изучающая закономерности механического движения и причины его возникновения, называется **механика** (от греческого слова *tekhnē* – “машина”, “механизм”).
- **Основная задача механики** – определение положения тела в произвольный момент времени.

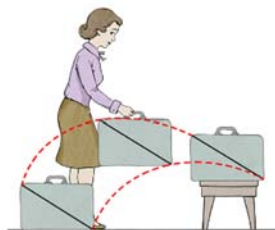
Для решения основной задачи механики необходимо определить, как движется тело, как меняется его положение с течением времени. Другими словами, необходимо установить связь между физическими величинами, характеризующими механическое движение.

- Раздел механики, изучающий механическое движение тел без учета причин возникновения этого движения, называется **кинематикой** (от греческого слова *kinēmatos* – “движение”).

Одним из самых простых видов механического движения является поступательное движение.

- **Поступательным** называется движение тела, при котором все его точки движутся одинаково.

При поступательном движении тела прямая линия, проходящая через две его произвольные точки, остается параллельной своему первоначальному положению. Например, поступательным является движение чемодана, показанное на рисунке (b). Так как при поступательном движении все точки тела движутся одинаково, то такое движение тела можно представить как движение одной его точки. По этой причине в механике используют идеализированную физическую модель, называемую **материальной точкой**.



- Тело, размерами которого в данных условиях можно пренебречь, называют **материальной точкой**.

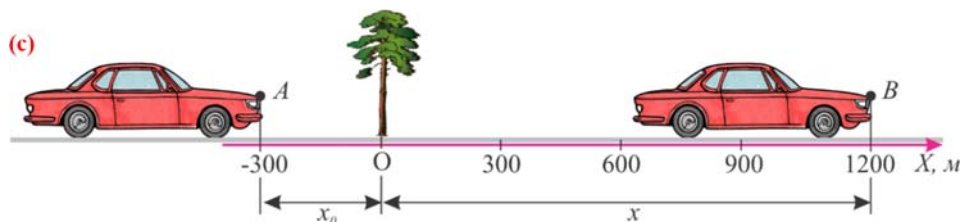
Для определения положения материальной точки в произвольный момент времени выбирается **тело отсчета**.

- **Телом отсчета** называется тело, относительно которого изучается движение материальной точки.

Тело отсчета выбирается произвольно, и оно условно считается неподвижным. Например, за тело отсчета можно принять Солнце, Землю, видимые звезды, вагон поезда, в котором вы едете, и другие.

Если тело отсчета выбрано, то положение материальной точки относительно него можно определить при помощи метода **координат**, или метода **радиус-вектора**.

**Определение положения материальной точки при помощи метода координат.** После выбора тела отсчета какая-либо точка этого тела принимается за начало отсчета, проводятся координатные оси, и положение любой материальной точки определяется этими координатами. Как это делается, вы изучали на уроках математики (см.: математика 5). Например, определим положение автомобиля на прямой дороге (c).



Для этого достаточно провести вдоль дороги одну координатную ось **OX**. За начальную точку отсчета на координатной оси (точка **O**) возьмем дерево, растущее на обочине дороги. В этом случае положение автомобиля определяется по его координате  $x$ . Вправо от начала координат вычисляемая координата положительна, а влево – отрицательна. Предположим, что в начальный момент

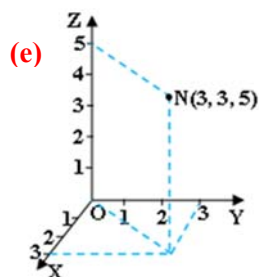
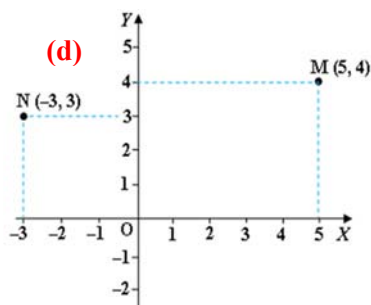
**Внимание!** Здесь слова “в данных условиях” означают, что одно и то же тело в одних условиях можно принять за материальную точку, а в других нельзя. Например, так как радиус Земли в 24 000 раз меньше расстояния от Земли до Солнца, то Землю при движении вокруг Солнца можно принять за материальную точку. Однако при изучении движения самолета, автомобиля, космического корабля и других относительно поверхности Земли, земной шар нельзя считать материальной точкой.

времени ( $t = 0$ ) автомобиль находился в точке с координатой  $-300$  м. Это его начальная координата  $x_0$  (точка А):  $x_0 = -300$  м. Автомобиль, двигаясь вдоль оси  $x$ , в момент времени  $t$  окажется в координате  $x = 1200$  м. Положение автомобиля в любой момент времени можно определить, зная зависимость координаты от времени  $x = x(t)$ .

Если тело движется на плоскости (например, кончик ручки по бумаге, лодка по озеру), то через выбранное тело отсчета проводятся две координатные оси  $OX$  и  $OY$ . Положение точки на плоскости определяется координатами  $x$  и  $y$ . Например, координаты точки  $M$ :  $x = 5$ ,  $y = 4$ ; координаты же точки  $N$ :  $x = -3$ ,  $y = 3$  (d).

Таким образом, зависимость координат движущегося тела от времени  $x = x(t)$  и  $y = y(t)$  описывает движение материальной точки на плоскости.

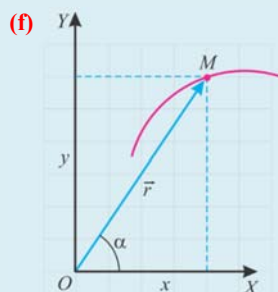
Для определения положения тела в пространстве (например, рыбы в воде, самолета в небе) с телом отсчета связывают трехмерную систему координат. В такой системе положение тела определяется тремя координатами —  $x$ ,  $y$  и  $z$  (e).



#### Определение положения материальной точки методом радиус-вектора.

• Вектор, соединяющий начало координат с материальной точкой, называется **радиус-вектором**.

Радиус-вектор обозначается буквой  $\vec{r}$ . Его длина (модуль) определяется расстоянием от начала координат до материальной точки (f). Радиус-вектор используется, если известен его модуль и направление в пространстве. Зависимость радиус-вектора от времени  $\vec{r}(t)$  описывает движение материальной точки.



Чтобы иметь полное представление о механическом движении материальной точки (по прямой линии, на плоскости или в пространстве), необходимо установить, как изменяются его координаты с течением времени. Для этого необходим прибор, измеряющий время (часы, обычно используется секундная стрелка часов), при помощи которого определяются координаты материальной точки в начальный момент  $t_0$ , в последующие моменты времени  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  и др.

Таким образом, механическое движение материальной точки изучается относительно выбранной **системе отсчета**:

• **Тело отсчета, система координат, связанная с этим телом, и прибор для отсчета времени образуют вместе систему отсчета.**



**Применение. Исследование-2**

**Определите координаты материальной точки (g)**

**Задача:** На рисунке изображено движение кончика маркера по доске (g). Определите координаты кончика маркера в момент времени  $t_0 = 0$  (в точке A), в момент времени  $t_1 = 2$  с (в точке B) и в момент времени  $t_3 = 4$  с (в точке C).

**Обсуждение результатов:**

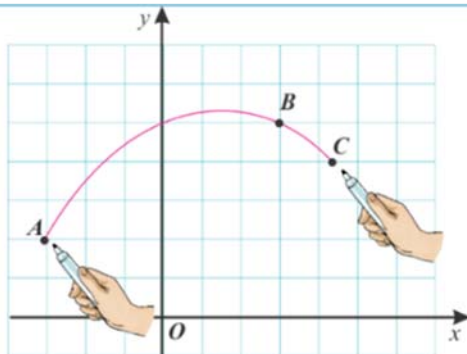
- Что необходимо знать для описания механического движения кончика маркера по доске?
- Как вы определили координаты кончика маркера для трех разных момента времени?

**Применение в повседневной жизни:**

1. Сколько координатных осей следует использовать для определения перемещения трактора в поле? Ответ обоснуйте.
2. Можете ли вы привести примеры поступательного движения из повседневной жизни?

**Провести самооценку:**

1. Какие понятия повторили на уроке? Что из этого вы хорошо поняли, а что осталось вам не ясным?
2. При каких условиях одно и то же тело можно принять за материальную точку, а при каких нельзя? Почему? Можете ли вы привести примеры?
3. Почему возникает необходимость применения системы отсчета?
4. Какую систему координат следует использовать для изучения положения тела в пространстве (например, летящей в небе птицы)?

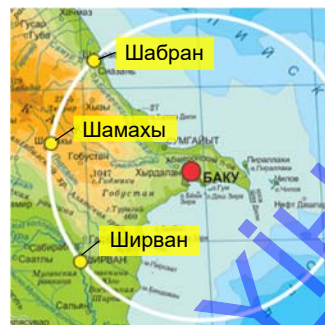


**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Запишите в рабочем листке определения для нижеприведенных понятий: “механическое движение”, “механика”, “основная задача механики”, “кинематика”, “поступательное движение”, “материальная точка”, “тело отсчета”, “система отсчета”.

## 1.2 Путь и перемещение

Автобус со школьниками отправился в путь в 8<sup>00</sup> из Баку с площади Азадлыг.

- Можно ли точно определить, куда доехал автобус в 10<sup>00</sup>, если он за два часа прошел расстояние 135 км? Почему?
- Может ли автобус снова вернуться в 10<sup>00</sup> на площадь Азадлыг?
- Достаточно ли для определения конечного положения тела знать его начальное положение и пройденный путь? Ответ обоснуйте.



### Исследование-1. Одинаковы ли пути (а) между двумя пунктами?

**Ресурсы:** транспортная карта дорог между городами Баку – Загатала (а), нить, линейка или курвиметр.

- Автомобильная дорога
- - - Железнодорожный путь
- Воздушный путь



**Ход исследования:** 1. Измерьте при помощи нити и линейки длину автомобильного, железнодорожного и воздушного путей между городами Баку – Загатала. 2. Выразите полученные значения в километрах на основе масштаба карты и запишите в соответствующих клетках таблицы 1.1 (перепишите таблицу в рабочий листок).

Таблица 1.1.

Транспортный путь	Автомобильный путь	Железнодорожный путь	Воздушный путь
Расстояние между Баку – Загатала (км)			

### Обсуждение результатов:

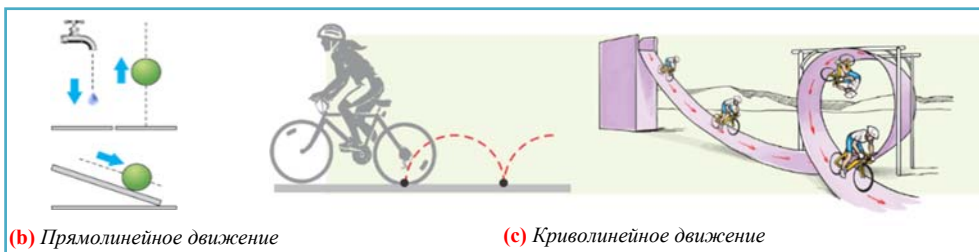
- Какой из трех туристов, путешествующих из Баку в Загатала, соответственно на автобусе, поезде и самолете, проехал меньшее расстояние? Кто из них проехал большее расстояние?

Вы знаете, что любой вид движения совершается по определенной *траектории*.

• **Траектория** – это линия, которую описывает материальная точка при своем движении в данной системе отсчета. Эта линия может быть и невидима, например, траектория движения рыбы в воде, самолета в небе, пчелы в воздухе и др., которые можно только вообразить. По форме траектории механическое движение делится на *прямолинейное* и *криволинейное*.

• Движение, траектория которого представляет собой прямую линию относительно данной системы отсчета, называется **прямолинейным движением (б)**, а движение, траектория которого кривая линия, – **криволинейным (с)**.

• Длина траектории движения материальной точки, называется **пройденным путем**. Пройденный путь является положительной скалярной величиной, обозначается буквой **l**, единица ее измерения в СИ – **l м**.



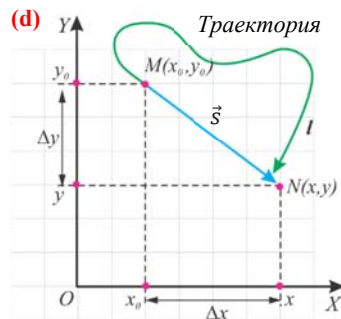
(б) Прямолинейное движение

(с) Криволинейное движение

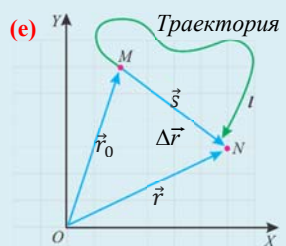
Для полного описания движения материальной точки необходимо определить изменение его положения в пространстве с течением времени, т.е. *определить изменение координат материальной точки, или же изменение его радиус-вектора*.

• Изменение любой физической величины равно разности его конечного и начального значений и обозначается знаком  $\Delta$  (буква греч. алфавита) перед этой величиной.

**Изменение координат материальной точки во время движения.** Изменение координат материальной точки во время движения может быть, как положительным, так и отрицательным. Например, предположим, что муравей, двигаясь по показанной на рисунке траектории, попадает из точки  $M$  в точку  $N$  (d). Так как координата муравья по оси  $X$  увеличивается ( $x > x_0$ ), то изменение координаты по этой оси будет положительным:  $\Delta x = x - x_0 > 0$ . Координата же муравья по оси  $Y$  уменьшается ( $y < y_0$ ), поэтому изменение его координаты по этой оси будет отрицательным:  $\Delta y = y - y_0 < 0$ .



**Изменение радиус-вектора материальной точки во время движения.** На следующем рисунке представлены радиус-векторы  $\vec{r}_0$  и  $\vec{r}$  начального и конечного положения, материальной точки (муравья) соответственно (e). Вектор  $\Delta \vec{r}$ , соединяющий концы этих радиус-векторов  $M$ , называют *перемещением* данной материальной точки за промежуток времени  $t$ . Согласно правилу сложения векторов (см.: математика 8):  $\vec{r}_0 + \Delta \vec{r} = \vec{r}$ . Из последнего выражения получается,  $\Delta \vec{r} = \vec{r} - \vec{r}_0$  или  $\vec{s} = \Delta \vec{r} = \vec{r} - \vec{r}_0$ , где  $\vec{s}$  – перемещение материальной точки.

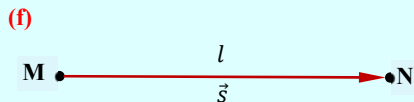


- **Перемещение** – это направленный отрезок прямой, соединяющий начальное положение движущейся материальной точки с ее конечным положением. Перемещение – векторная величина.
- **Векторная величина** – это величина, определяемая, кроме числового значения (модуля), также и направлением.

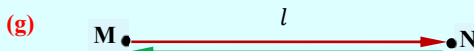
К вектору перемещения, как векторной величине, можно применить известные действия над векторами – сложение и вычитание векторов, определение результирующего вектора методом треугольника и параллелограмма.

Единицей измерения перемещения, как и пути, в СИ является метр, однако, перемещение имеет отличающийся физический смысл: *перемещение показывает, на какое расстояние и в каком направлении изменилось начальное положение материальной точки за данный промежуток времени.*

**Внимание!** Только при прямолинейном движении без изменения направления, модуль перемещения равен пройденному пути, во всех остальных случаях (при изменении направления прямолинейного движения, криволинейном движении) пройденный путь больше модуля перемещения (e).



Материальная точка прошла расстояние  $l$  от точки  $M$  до точки  $N$  по прямой линии. В этом случае пройденный путь равен модулю перемещения:  $s = l$ .

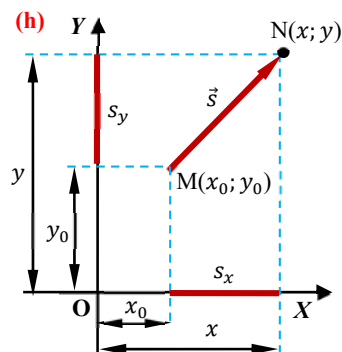


Материальная точка прошла расстояние  $l$  от точки  $M$  до точки  $N$  по прямой линии, а затем по этой же линии вернулась назад в точку  $M$ . В этом случае материальная точка прошла путь, равный  $2l$ , а модуль перемещения равен нулю:

$$\vec{s} = \vec{MN} + \vec{NM} = 0, \quad s = MN + NM = 2l.$$

Если при движении материальной точки на плоскости известны его начальные координаты и вектор перемещения, то можно определить координаты конечного положения точки. Например, предположим, что материальная точка совершила перемещение  $\vec{s} = \overrightarrow{MN}$ . Опустя перпендикуляры на оси  $OX$  и  $OY$  из начала и конца этого вектора, получаем проекции перемещения  $s_x$  и  $s_y$  (h). Как видно из рисунка, эти проекции равны разности начальных и конечных координат материальной точки:

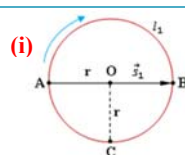
$$s_x = x - x_0, \quad s_y = y - y_0.$$



### Применение. Исследование-2

#### Одинаковы ли путь и перемещение?

**Задача.** Велосипедист движется по круговому велотреку радиусом 80 м. Он стартует из точки А. Определите путь и перемещение велосипедиста при первом прохождении точки В (i).



Дано:	Решение	Вычисление
$r = 80 \text{ м}$	Пройденный путь $l_1$ равен длине дуги: $l_1 = \pi r$ .	$l_1 = 3,14 \cdot 80 \text{ м} = 251,2 \text{ м}$ ,
$l_1 - ?$	Модуль перемещения же равен диаметру окружности: $s_1 = D = 2r$ .	$s_1 = 2 \cdot 80 \text{ м} = 160 \text{ м}$ .
$s_1 - ?$		

#### Обсуждение результатов:

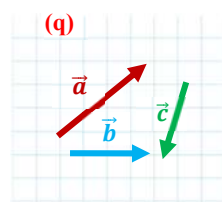
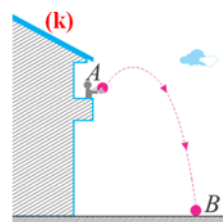
- Чем отличаются путь и перемещение?
- Чему равны пройденный путь и модуль перемещения велосипедиста при движении из точки А в точку С?
- Чему будет равен пройденный путь и модуль перемещения велосипедиста, совершившего один полный оборот и вернувшегося снова в точку А?
- Мяч, брошенный с балкона (из точки А), падает на землю, в точку В. Можете ли вы схематически показать пройденный им путь и перемещение (k)?

#### Применение в повседневной жизни:

По какой из приведенных в исследовании 1 схем турист, путешествуя из Баку в Загаталу, совершает перемещение? Почему?

#### Провести самооценку:

1. Какие определения были повторены на уроке? Что вам в это время стало более понятно, а что осталось не ясным?
2. В каком случае пройденный путь равен модулю перемещения? Приведите пример.
3. Может ли пройденный путь равняться нулю? Почему?
4. Может ли модуль перемещения движущегося тела равняться нулю? Почему? Приведите пример.
5. Как, следуя правилу треугольника, определяется результирующая векторов ( $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$ ,  $\vec{c}$ ) (q)? Как, следуя правилу параллелограмма, определяется результирующая этих векторов? Представьте схематически соответствующие правила.



**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Дайте определения физических понятий и величин: “траектория”, “пройденный путь”, “перемещение”, “скалярная величина”, “векторная величина”.

### 1.3 ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ. СКОРОСТЬ

Автомобиль движется по прямолинейной части дороги Гаджигабул-Гянджа автобана Баку-Газах так, что за каждый 1 час проходит путь 90 км, за 30 минут – 45 км, за 15 минут – 22,5 км, за 10 минут – 15 км, за 5 минут – 7,5 км, за 1 минуту – 1,5 км и т.д.

- Что можно сказать о самой скорости автомобиля и ее изменении?
- Что необходимо знать для определения положения автомобиля в произвольный момент времени?

#### Исследование-1. Исследование прямолинейного движения шарика

**Оборудование:** цилиндрическая толстостенная стеклянная трубка закрытая с одного конца, вода в достаточной степени насыщенная сахаром (высококонцентрированный раствор сахара – 1 л), маркер, секундомер, металлический шарик (2–3 штуки), линейка, штатив.

##### Ход исследования:

1. Закрепите трубку вертикально на штативе, наполните ее высококонцентрированным раствором (а).
2. Опустите шарик в раствор. Включите секундомер при прохождении шарика через заранее отмеченную точку А. Определите перемещения  $\Delta \vec{s}_1, \Delta \vec{s}_2, \Delta \vec{s}_3 \dots$ , отмечая маркером на стенке трубки, положение шарика, движущегося вертикально, за равные промежутки времени  $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t_3 = \dots = 5\text{ с}$ .
3. Занесите полученные результаты в соответствующие клетки таблицы 1.2 и вычислите скорость шарика (перенесите таблицу на рабочий листок).

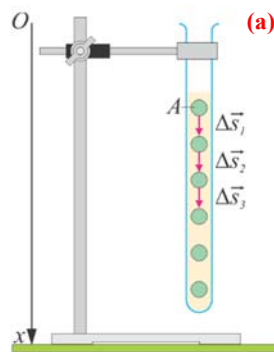


Таблица 1.2.

Промежутки времени	$\Delta t_1 = 5\text{ с}$	$\Delta t_2 = 5\text{ с}$	$\Delta t_3 = 5\text{ с}$	$\Delta t_4 = 5\text{ с}$
Модуль перемещения	$\Delta s_1 = \dots$	$\Delta s_2 = \dots$	$\Delta s_3 = \dots$	$\Delta s_4 = \dots$
Модуль скорости	$v_1 = \frac{\Delta s_1}{\Delta t_1} = ..$	$v_2 = \frac{\Delta s_2}{\Delta t_2} = ..$	$v_3 = \frac{\Delta s_3}{\Delta t_3} = ..$	$v_4 = \frac{\Delta s_4}{\Delta t_4} = ..$

4. Повторите опыт со вторым таким же шариком, уменьшив равные промежутки времени, и определите соответствующие перемещения.

##### Обсуждение результатов:

- Какие перемещения совершаются шариком за равные промежутки времени?
- Можно ли после проведенных вычислений сказать, что шарик совершает равномерное прямолинейное движение? Ответ обоснуйте.

Из курса Физики VII класса вам известно, что равномерное прямолинейное движение является самым простым видом механического движения.

• **Прямолинейное равномерное движение** – это движение по прямой линии, при котором материальная точка за равные промежутки времени совершает одинаковые перемещения.

• При прямолинейном равномерном движении модуль и направление скорости с течением времени не изменяются:  $\vec{v} = \text{const}$ .

• Скорость при прямолинейном равномерном движении является постоянной физической величиной, равной отношению перемещения материальной точки ко времени, за которое это перемещение было совершено:

$$\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t} \quad (1.1)$$



Так как отношение  $\frac{1}{t}$  в формуле является положительной скалярной величиной, то направление вектора скорости  $\vec{v}$  совпадает с направлением вектора перемещения  $\vec{s}$ . Единица измерения скорости в СИ – метр в секунду:

$$[v] = \frac{[s]}{[t]} = \frac{1\text{м}}{1\text{с}} = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Если скорость  $\vec{v}$  известна, то можно определить перемещение  $\vec{s}$  материальной точки за промежуток времени  $t$  при прямолинейном равномерном движении:

$$\vec{s} = \vec{v} \cdot t \quad (1.2)$$

• При прямолинейном равномерном движении пройденный телом путь равен модулю перемещения:

$$l = s = v t \quad (1.3)$$

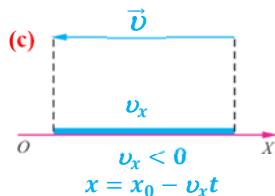
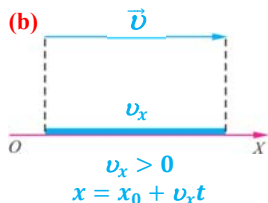
Так как уравнение в векторном виде можно заменить алгебраическими уравнениями в проекциях векторов, то для вычисления перемещения используют не формулу, выраженную через векторы, а формулу, содержащую в себе проекции векторов на координатные оси. При прямолинейном движении положение материальной точки определяется одной координатой  $X$ , определяются проекции векторов скорости и перемещения материальной точки на эту ось и уравнение решается в этих проекциях. Поэтому выражение (1.2) можно записать в проекциях перемещения и скорости на ось  $OX$ :

$$s_x = v_x t \quad (1.4)$$

Можно получить формулу для вычисления координаты точки  $x$  в произвольный момент времени (см.: тема 1.2):

$$x = x_0 + s_x, \quad x = x_0 + v_x t \quad (1.5)$$

Выражение (1.5) является уравнением прямолинейного равномерного движения тела. Если материальная точка движется по направлению выбранной координатной оси  $OX$ , то проекция скорости считается положительной (b), если же движется против направления координатной оси, то проекция скорости считается отрицательной (c).



Из формулы (1.5) определяется выражение для проекции скорости:

$$v_x = \frac{x - x_0}{t}. \quad (1.6)$$

Из формулы (1.6) становится ясным физический смысл скорости: проекция скорости на ось равна изменению проекции соответствующей координаты за единицу времени.

Пройденный путь и координата материальной точки при прямолинейном равномерном движении являются линейной функцией от времени (d). Скорость же является постоянной величиной, поэтому график скорость – время будет представлять собой линию, параллельную оси времени – скорость такого движения не зависит от времени (e):

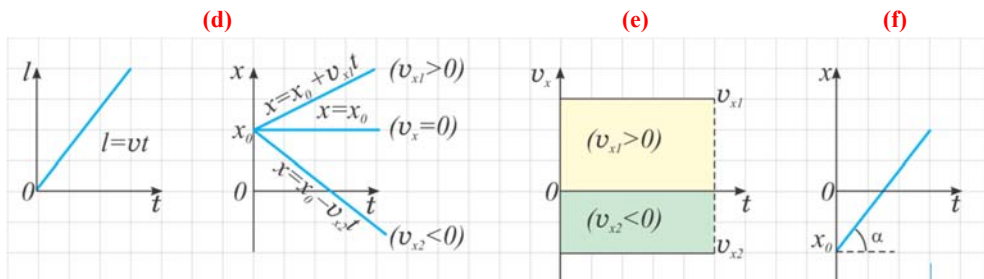
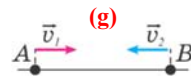


График координата-время при равномерном движении образует определенный угол с осью времени. Тангенс этого угла равен проекции (модулю) скорости по оси  $ox$  (f):  $tg\alpha = \frac{\Delta x}{t} = v_x$ .

### Применение. Исследование-2. Примените изученное для решения задачи

**Задача.** Два велосипедиста одновременно начали движение навстречу друг другу вдоль прямой линии из пунктов А и В, расстояние между которыми 90 км. Скорость первого велосипедиста  $3\frac{M}{c}$ , скорость второго велосипедиста  $1,5\frac{M}{c}$  (g). Определите: а) координату и время  $t_1$  встречи велосипедистов; б) пройденные велосипедистами пути и совершенные ими перемещения к моменту встречи; в) время  $t_2$ , прошедшее с начала движения до момента, когда расстояние между ними стало 10 км.



Дано:

$$l = 90 \text{ км} = 90000 \text{ м}$$

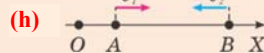
$$v_1 = 3\frac{M}{c}, v_2 = 1,5\frac{M}{c}$$

а)  $t_1$  -?  $x_1, x_2$  -? б)  $l_1, l_2$  -?  $s_{x1}, s_{x2}$  -? в)  $t_2$  -?

Решение

а) При решении задачи соблюдается следующая последовательность действий:

**I действие.** Выбирается система координат  $OX$  с началом координат в точке А и рисуется схема (h).



**II действие.** Уравнение движения записывается в общем виде:  $x = x_0 + v_x t$ .

**III действие.** На основании условия задачи уравнения движения велосипедистов записываются в общем виде:  $x_1 = v_{1x} t = 3 t$ ;  $x_2 = x_0 - v_{2x} t = 90000 - 1,5 t$ .

**IV действие.** Координаты велосипедистов при встрече равны:  $x_1 = x_2$ . Это равенство решается для  $t = t_1$ :

$$3t_1 = 90000 - 1,5t_1, \\ 4,5t_1 = 90000 \rightarrow t_1 = \frac{90000}{4,5} \text{ с} = 20000 \text{ с} \approx 5,6 \text{ часа.}$$

**V действие.** Для определения координат  $x_1$  и  $x_2$  встречи велосипедистов необходимо решить уравнения их движения для времени  $t_1$ :

$$x_1 = v_{1x} t_1 = 3\frac{M}{c} \cdot 20000 \text{ с} = 60000 \text{ м} = 60 \text{ км};$$

Так как  $x_2 = x_1$ , то  $x_2 = 60 \text{ км}$ .

б) Так как по условию задачи велосипедисты движутся прямолинейно и без изменения направления движения, то пройденный путь равен проекции (модулю) перемещения:

$$l_1 = s_{1x} = x_1 - x_0; l_2 = s_{2x} = x_2 - x_0.$$

в) Время  $t_2$ , прошедшее с начала движения до момента, когда между ними осталось 10 км, вычисляется по нижеприведенному равенству:

$$x_1 - x_2 = 10000 \text{ м или } v_{1x} t_2 - x_0 - v_{2x} t_2 = 10000 \text{ м.}$$

### Обсуждение результатов:

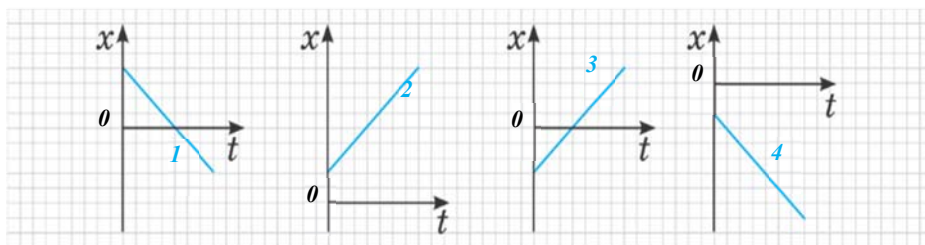
- Какое расстояние прошел каждый велосипедист до встречи?
- Через какое время после начала движения расстояние между велосипедистами будет 10 км?

### Применение в повседневной жизни:

- Автобус, двигаясь со скоростью  $90 \frac{\text{км}}{\text{час}}$ , за 20 секунд совершает перемещение, равное перемещению легкового автомобиля, которое тот совершает за 10 с. Определите скорость легкового автомобиля.

### Провести самооценку:

1. Какие определения были повторены на уроке? Что вам в это время стало более понятно, а что осталось не ясным?
2. Уравнение движения материальной точки имеет вид  $x = x_0 + v_x t$ . Что необходимо знать для определения ее положения в произвольный момент времени?
3. На рисунке представлены графики зависимости координата-время материальной точки, движущейся по оси  $x$ .



- Какой график показывает движение материальной точки через начало координат?
  - Какой график показывает движение материальной точки против направления оси  $x$ ?
  - На каком графике  $x_0$  и  $v_x$  имеют противоположные знаки, а на каком одинаковые?
4. Пешеход и велосипедист движутся навстречу друг другу. Зависимость координаты пешехода от времени  $x = 13 + 2t$ , а велосипедиста  $x = 27 - 5t$ . Представьте эти зависимости на одном графике и определите время их встречи.

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Дайте определения физических понятий и величин: “скорость”, “равномерное прямолинейное движение”, “проекция скорости по оси”, “путь, пройденный при равномерном прямолинейном движении”.

## 1.4

## ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ НЕРАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ. УСКОРЕНИЕ

На практике прямолинейное равномерное движение наблюдается очень редко. Скорость движущегося автомобиля, поезда, самолета, частей механизма и т.д. может изменяться и по величине, и по направлению.

- Можно ли описать неравномерное движение с помощью уравнений прямолинейного равномерного движения? Что для этого нужно знать?

**Исследование-1. Что означает быстрота изменения скорости?**

**Задача:** Самолет, готовящийся к взлету, находился в точке А взлетной полосы. Скорость самолета через 5 секунд после начала движения равна  $v_1 = 18 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  (в точке В), а через 10 секунд равна  $v_2 = 30 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  (в точке С) (а). Чему равно изменение скорости ( $\Delta v_1$  и  $\Delta v_2$ ) на взлетной полосе самолета, соответствующее участкам АВ и ВС? В каком интервале времени происходит наибольшее изменение скорости?



Дано	Решение	Вычисление
$t_0 = 0 \rightarrow v_0 = 0$	$\Delta v_1 = v_1 - v_0$	....
$t_1 = 5 \text{ с} \rightarrow v_1 = 18 \text{ м/с}$	$\Delta v_2 = v_2 - v_1$	....
$t_2 = 10 \text{ с} \rightarrow v_2 = 30 \text{ м/с}$	$\Delta t_1 = t_1 - t_0$	....
$\Delta v_1 - ? \Delta v_2 - ? \frac{\Delta v_1}{\Delta t_1} - ? \frac{\Delta v_2}{\Delta t_2} - ?$	$\Delta t_2 = t_2 - t_1$	....

**Обсуждение результатов:**

- На каком участке взлетной полосы изменение скорости самолета больше?
- В чем физический смысл изменения скорости тела и насколько важно это знать?

• *Прямолинейное движение, при котором за равные промежутки времени материальная точка совершает разные перемещения, называют **прямолинейным неравномерным движением**.*

При таком движении числовое значение скорости не остается неизменным, поэтому для описания неравномерного движения пользуются понятиями **средней** и **мгновенной скорости**.

**Средняя скорость.**

- *Средняя скорость неравномерно движущейся материальной точки на данном участке траектории равна отношению ее перемещения на этом участке ко времени совершения этого перемещения:*

$$\vec{v}_{\text{ср}} = \frac{\vec{s}}{t}. \quad (1.7)$$

- *Средняя путевая скорость материальной точки при неравномерном движении равна отношению всего пройденного пути ко времени, затраченному на прохождение этого пути:*

$$v_{\text{ср}} = \frac{l_{\text{об}}}{t_{\text{об}}}. \quad (1.8)$$

Средняя скорость материальной точки, движущейся со скоростями  $v_1, v_2, \dots, v_n$  на участках пути  $l_1, l_2, \dots, l_n$  за промежутки времени  $t_1, t_2, \dots, t_n$ , соответственно, вычисляется так:

$$v_{\text{ср}} = \frac{l_{\text{об}}}{t_{\text{об}}} = \frac{l_1 + l_2 + \dots + l_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}, \quad (1.9)$$

$$v_{\text{ср}} = \frac{v_1 t_1 + v_2 t_2 + \dots + v_n t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}. \quad (1.10)$$

Если  $t_1 = t_2 = \dots = t_n = t$ , то из уравнения (1.10) получается

$$v_{\text{ср}} = \frac{v_1 + v_2 + \dots + v_n}{n}. \quad (1.11)$$

### Мгновенная скорость.

- Скорость материальной точки в данный момент времени или в данной точке траектории называют **мгновенной скоростью**.

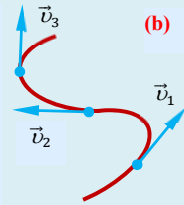
Мгновенная скорость в некоторой точке является векторной величиной и определяется как предел отношения достаточно малого перемещения ( $\Delta \vec{s}$ ) на участке траектории, включающей эту точку, к малому промежутку времени ( $\Delta t$ ), затраченному на это перемещение (при условии  $\Delta t \rightarrow 0$ ):

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{s}}{\Delta t}. \quad (1.12)$$

Где  $\vec{v}$  – мгновенная скорость поступательного движения материальной точки.

С течением времени мгновенная скорость может увеличиваться, уменьшаться и изменять направление. Направление мгновенной скорости в данной точке траектории совпадает с направлением касательной к траектории в этой точке (b). Проекция вектора мгновенной скорости в прямоугольной системе координат равна первой производной координаты по времени:

$$v_x = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt} = x'(t). \quad (1.13)$$



**Ускорение.** Быстрота изменения мгновенной скорости при неравномерном движении по величине и направлению характеризуется векторной физической величиной, называемой **ускорением**:

- Ускорение – это физическая величина, равная отношению изменения скорости ко времени, за которое это изменение произошло:

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}. \quad (1.14)$$

Если измерение времени начинается с нуля  $\Delta t = t - 0 = t$ , то:

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t} = \frac{\Delta \vec{v}}{t}. \quad (1.15)$$

Направление ускорения совпадает с направлением вектора  $\Delta \vec{v}$ .

Для простоты здесь и в последующем будет рассматриваться такое неравномерное прямолинейное движение материальной точки, при котором за любые равные промежутки времени происходит одинаковое изменение скорости. Такое движение называется **равнопеременным движением**.

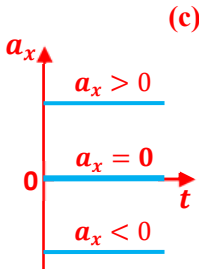
- **Равнопеременное движение** – это движение, при котором за любые равные промежутки времени происходит одинаковое изменение скорости. При равнопеременном движении значение и направление ускорения не меняются:

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t} = \frac{\Delta \vec{v}}{t} = \text{const}. \quad (1.16)$$

При равнопеременном движении проекция ускорения на любую ось, например ось  $x$ , также постоянная:

$$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t} = \text{const}. \quad (1.17)$$

Это значит, что при равнопеременном движении график зависимости ускорения от времени представляет собой прямую линию, параллельную оси времени, – проекция ускорения на выбранную ось от времени не зависит (c).





В СИ за единицу ускорения принят  $1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$  – ускорение такого равнопеременного движения, при котором материальная точка за 1 секунду изменяет свою скорость на  $1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ :

$$[a] = \frac{[\Delta v]}{[\Delta t]} = \frac{1 \text{ м/с}}{\text{с}} = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

**Знаете ли вы?** Ускорение – одна из наиболее значимых величин, используемых в физике и технике. Известно, что при постепенном торможении автомобиля, автобуса и поезда пассажиры не чувствуют дискомфорта, однако при резком торможении для них возникает серьезная опасность. Значит, важно не просто изменение скорости, а быстрота изменения скорости. Для контроля за изменением скорости машин и механизмов используется прибор, измеряющий ускорение – акселерометр (лат.: *accelero* – “ускоряю” и греч.: *metreo* – “измеряю”) (d).



#### Применение. Исследование-2. Чему равна средняя скорость?

**Задача:** Велосипедист первую половину прямолинейного пути проходит с постоянной по модулю скоростью  $4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , а вторую половину – с постоянной по модулю скоростью  $6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Определите среднюю скорость велосипедиста на всем пути.

Дано	Решение
$v_1 = 4 \text{ м/с}$ $v_2 = 6 \text{ м/с}$ $v_{\text{ср}} = ?$	$v_{\text{ср}} = \frac{l}{t} = \frac{l_1 + l_2}{t_1 + t_2}.$ <p>Поскольку <math>l_1 = \frac{l}{2} = v_1 t_1</math>, то <math>t_1 = \frac{l}{2v_1}</math>.</p> <p>Аналогично: <math>t_2 = \frac{l}{2v_2}</math>.</p> <p>Таким образом: <math display="block">v_{\text{ср}} = \frac{l}{t} = \frac{l}{\frac{l}{2v_1} + \frac{l}{2v_2}} = \frac{1}{\frac{1}{2v_1} + \frac{1}{2v_2}} = \frac{2v_1 v_2}{v_1 + v_2}.</math></p>
Вычисление	
...	

#### Обсуждение результатов:

- Какой формулой определяется средняя скорость на пути, состоящем из двух равных участков?
- Какой формулой определяется средняя скорость велосипедиста, движущегося в течение двух равных последовательных промежутков времени ( $t_1 = t_2$ ), соответственно, со скоростями  $v_1$  и  $v_2$ ?

#### Применение в повседневной жизни:

- Какую скорость измеряет спидометр автомобиля: среднюю или мгновенную? Ответ обоснуйте.

#### Провести самооценку:

1. Какие понятия повторили на уроке? Что из этого вы хорошо поняли, а что осталось вам не ясным?
2. Чем отличаются друг от друга средняя путевая скорость и средняя скорость перемещения?
3. Каков физический смысл ускорения?
4. Чему равны, соответственно, ускорения при равномерном и неравномерном прямолинейном движении? Почему?
5. Как направлен вектор ускорения автомобиля, если он начинает прямолинейное движение из состояния покоя? Почему?
6. Как направлен вектор ускорения автомобиля, если он начинает тормозить? Почему?

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Дайте определения следующим понятиям: “прямолинейное неравномерное движение”, “средняя скорость”, “мгновенная скорость”, “ускорение”, “равнопеременное движение”.

## 1.5

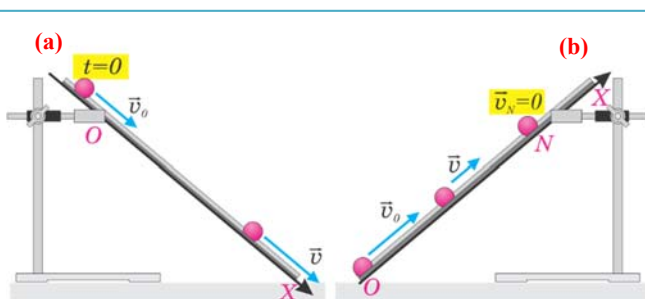
## СКОРОСТЬ И ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ПРИ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ РАВНОПЕРЕМЕННОМ ДВИЖЕНИИ

Самолет движется по взлетной полосе в направлении координатной оси  $x$  с постоянным ускорением  $a_x = 6 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .

- Чему равно изменение скорости самолета за каждую секунду?
- Каков график зависимости проекции ускорения от времени для этого движения?
- От чего зависят проекции скорости и перемещения при прямолинейном равнопеременном движении? Как это можно определить?

**Исследование-1.** От чего зависит скорость при равнопеременном движении?

**Задача.** На рисунке представлен шарик, движущийся равнопеременно вниз и вверх по наклонному желобу с начальной скоростью  $\vec{v}_0$  (а и б). Нарисуйте проекции ускорений на оси OX для обоих движений и определите их знаки.



**Обсудите результат:**

- Как можно записать в векторном виде формулу скорости шарика, движущегося равнопеременно?
- Можете ли записать в общем виде формулу проекции скорости шарика, движущегося равнопеременно вверх и вниз по наклонному желобу?
- Чему равна проекция ускорения шарика в точке N в общем виде, движущегося равнопеременно вверх с начальной скоростью  $\vec{v}_0$  по наклонному желобу?

**Скорость при равнопеременном прямолинейном движении.** Из формулы (1.14) видно, что если известны ускорение  $\vec{a}$  и начальная скорость тела  $\vec{v}_0$ , то можно определить его скорость в любой момент времени:

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t, \quad (1.18)$$

или ее проекцию на ось  $x$ :

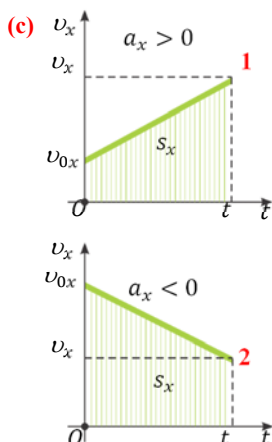
$$v_x = v_{0x} + a_x t. \quad (1.19)$$

Если начальная скорость равна нулю ( $v_{0x} = 0$ ), то:

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

Из этих выражений видно, что скорость при равнопеременном движении является линейной функцией от времени. График зависимости скорости от времени – прямая линия, проходящая через начало координат (или через  $v_{0x}$ ). Эта линия, в соответствии с увеличением или уменьшением скорости, направлена вверх или вниз (с).

**Перемещение при равнопеременном прямолинейном движении.** Формулу для определения перемещения при равнопеременном движении можно вывести на основе графика скорость-время. Проекция перемещения равна площади фигуры между графиком  $v_x(t)$  и осью времени.



На приведенных графиках – это заштрихованная фигура трапеции (см: **с**):

$$s_x = \frac{v_{0x} + v_x}{2} \cdot t, \quad (1.21)$$

или в векторной форме:

$$\vec{s} = \frac{\vec{v}_0 + \vec{v}}{2} \cdot t. \quad (1.22)$$

Если в последнюю формулу вместо  $\vec{v}$  подставить выражение (1.18), то получим обобщенную формулу перемещения для равнопеременного движения:

$$\vec{s} = \frac{\vec{v}_0 + \vec{v}}{2} \cdot t = \frac{\vec{v}_0 + (\vec{v}_0 + \vec{a}t)}{2} \cdot t = \vec{v}_0 t + \frac{1}{2} \vec{a} t^2.$$

$$s_x = v_{0x} t + \frac{1}{2} a_x t^2. \quad (1.23)$$

Таким образом, формула проекции перемещения (например, на ось  $x$ ) при равнопеременном прямолинейном движении будет:

$$s_x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}, \quad (1.24)$$

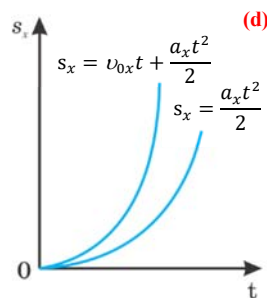
а формула координаты:

$$x = x_0 + v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}. \quad (1.25)$$

(1.23) является формулой перемещения при равнопеременном движении в векторной форме, а (1.24) и (1.25) обобщенными формулами координаты и проекции перемещения, соответственно. Если материальная точка начинает движение из состояния покоя ( $v_{0x} = 0$ ), то:

$$s_x = \frac{a_x t^2}{2}. \quad (1.26)$$

Как видно из формулы, проекция перемещения при прямолинейном равнопеременном движении пропорциональна квадрату времени ( $s_x \sim t^2$ ), и его график представляет собой параболу, проходящую через начало координат (**д**).



В некоторых случаях возникает необходимость определить перемещение материальной точки, не зная время  $t$ , прошедшее от начала движения. Такую задачу можно решить тогда, когда известны ускорение, начальное и конечное значения скорости. Для получения этой формулы из выражения (1.19) получаем  $t$ :

$$t = \frac{v_x - v_{0x}}{a_x}.$$

Это выражение подставляется в формулу (1.21):

$$s_x = \frac{v_{0x} + v_x}{2} \cdot \frac{v_x - v_{0x}}{a_x}.$$

После простых преобразований получаем:

$$s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}. \quad (1.27)$$

Для проекции конечной скорости получаем:  $v_x = \sqrt{v_{0x}^2 + 2a_x s_x}$ . (1.28)

Если движение начинается из состояния покоя ( $v_{0x} = 0$ ), то проекции перемещения и скорости будут равны:

$$s_x = \frac{v_x^2}{2a_x} \quad (1.29)$$

$$v_x = \sqrt{2a_x s_x}. \quad (1.30)$$

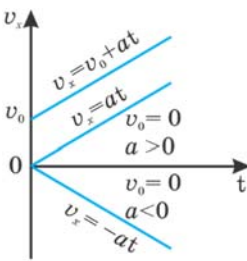
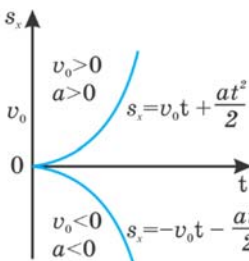
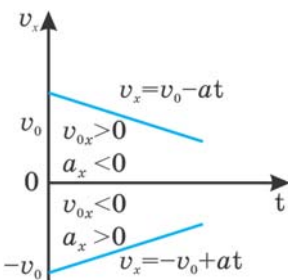
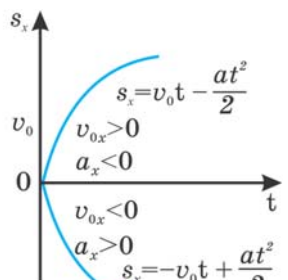
**Равноускоренное и равнозамедленное движения.** Равнопеременное движение по характеру может быть или *равноускоренным*, или же *равнозамедленным*.

- При равноускоренном движении векторы  $\vec{v}_0$  и  $\vec{a}$  имеют одинаковые направления. В этом случае знаки у обеих проекций  $v_{0x}$  и  $a_x$  или положительные, или же отрицательные. Если материальная точка начнет движение из состояния покоя ( $v_{0x} = 0$ ), то независимо от направления движения, оно во всех случаях будет равноускоренным.

- При равнозамедленном движении векторы  $\vec{v}_0$  и  $\vec{a}$  имеют противоположные направления. В этом случае проекции  $v_{0x}$  и  $a_x$  имеют противоположные знаки, если один из них отрицательный, то другой – положительный.

В таблице 1.3 даны формулы и соответствующие графики равноускоренного и равнозамедленного прямолинейного движения.

Таблица 1.3.

Прямолинейное равноускоренное движение		
$v_x = v_{0x} + a_x t,$ $v_x = a_x t,$ $v_x = -v_{0x} - a_x t,$ $v_x = -a_x t,$ $s_x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2},$ $s_x = -v_{0x} t - \frac{a_x t^2}{2},$ $s_x = \pm \frac{a_x t^2}{2}.$	 	
<p><b>Примечание:</b> так как <math>s_x \sim t^2</math> (<math>v_{0x} = 0</math>), то отношение проекций перемещения равно отношению квадратов соответствующих промежутков времени:</p> $s_{1x} : s_{2x} : s_{3x} : \dots : s_{nx} = t_1^2 : t_2^2 : t_3^2 : \dots : t_n^2.$ <p>Это соотношение иногда называется “правило путей”.</p>		
Прямолинейное равнозамедленное движение		
$v_x = v_{0x} - a_x t,$ $v_x = -v_{0x} + a_x t,$ $s_x = v_{0x} t - \frac{a_x t^2}{2},$ $s_x = -v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}.$	 	

### Применение. Исследование-2

**Можете ли построить соответствующие графики?**

**Задача:** На рисунке дан график зависимости проекции скорости материальной точки от времени для равнопеременного прямолинейного движения. В соответствии с этим графиком постройте графики зависимости проекций перемещения и ускорения материальной точки от времени.

**Обсуждение результатов:**

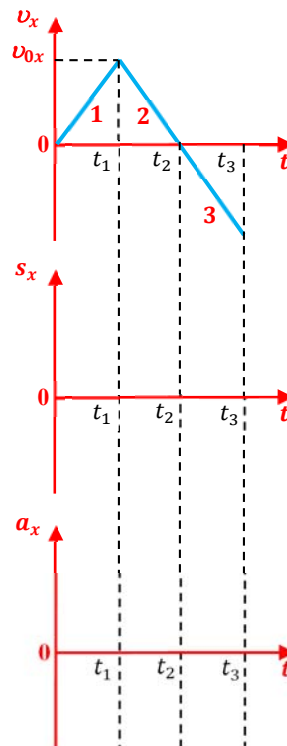
- Как на основе графика зависимости проекции скорости от времени, были определены соответствующие графики зависимости проекций перемещения и ускорения от времени?
- Как на основе графика зависимости проекции скорости от времени можно определить равноускоренное это или равнозамедленное движение?

**Применение в повседневной жизни:**

- Чему равна проекция скорости автомобиля при прямолинейном движении с начальной скоростью  $v_{0x} = 15 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  и ускорением  $a_x = 2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$  в момент времени  $t = 20 \text{ с}$ ?

**Провести самооценку:**

1. Какие понятия повторили на уроке? Что из этого вы хорошо поняли, а что осталось вам не ясным?
2. Проекция скорости автомобиля при прямолинейном равнопеременном движении изменяется по закону  $v_x = 21 - 7t$ . В соответствии с этим:
  - а) постройте график зависимости проекции скорости от времени;
  - б) определите проекции начальной скорости и ускорения автомобиля;
  - в) определите характер равнопеременного движения;
  - г) определите, при каком значении  $t$  автомобиль останавливается;
  - д) запишите уравнение движения автомобиля.



**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Дайте определения изученным понятиям и постройте графики зависимости проекции скорости от времени, проекции перемещения от времени и проекции ускорения от времени на основе соответствующих уравнений.

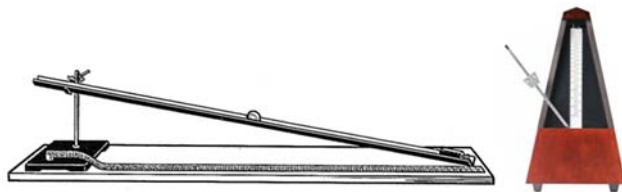
- **ПРОЕКТ** • Постройте карту понятия “прямолинейное равнопеременное движения” (как образец смотрите: 1 глава “Карта понятий”).

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА

### “ПРАВИЛО ПУТЕЙ” ДЛЯ РАВНОУСКОРЕННОГО ДВИЖЕНИЯ

**Цель:** научиться определять “правило путей” (отношение путей) равноускоренного движения шарика, катящегося по наклонному желобу.

**Оборудование:** желоб Галилея, шарик, металлический цилиндр (из набора “удельная теплопроводность”), метроном (или секундомер), измерительная лента, штатив с муфтой и зажимом.



**Ход исследования:**

#### I этап. Измерение ускорения движения шарика.

1. Желоб закрепите наклонно в штативе так, чтобы он образовывал с поверхностью небольшой угол. Для остановки движущегося шарика в нижней части желоба помещается металлический цилиндр. Метроном настраивается так, чтобы он за одну минуту совершил 120 ударов.

2. Шарик отпускают с верхней части желоба, и в тот же момент включают метроном. Наклон желоба необходимо отрегулировать так, чтобы шарик столкнулся с цилиндром на 4-м ударе метронома. Для этого случая время движения шарика  $t = 2$  с, а пройденное им расстояние  $s = 132 \text{ см} \pm 1 \text{ см}$ .

3. Модуль ускорения шарика, начинающего движение из состояния покоя ( $v_0 = 0$ ), вычисляется по формуле  $a = \frac{2s}{t^2}$ .

#### II этап. Определение “правила путей”.

1. Неизменяя условий, опыт повторяется, и по формуле  $l = \frac{at^2}{2}$  вычисляются пути, пройденные шариком, соответственно, за последовательные промежутки времени  $t_1 = 1 \text{ с}$ ,  $t_2 = 2 \text{ с}$ ,  $t_3 = 3 \text{ с}$ ,  $t_4 = 4 \text{ с}$ .

2. Полученные выражения отметьте в данной таблице и определите, чему равно отношение пройденных путей – “правило путей”:

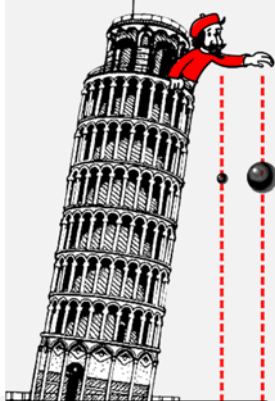
$$l_1 : l_2 : l_3 : l_4 = \dots ?$$

Номер опыта	Число ударов метронома	$a, \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$	$l, \text{м}$	$t, \text{с}$	$l_1 : l_2 : l_3 : l_4 = \dots ?$
1		$\approx 0,66$		1	
2				2	
3				3	
4				4	

3. Обобщите полученные результаты из опыта.



## 1.6 СВОБОДНОЕ ПАДЕНИЕ ТЕЛА



В конце XVI века итальянский ученый Галилео Галилей проводил простые эксперименты, которые привели одному большому открытию. Он одновременно сбрасывал мраморный шарик массой 80 кг и мушкетную пулю массой 200 г с наклонной башни в итальянском городе Пиза, и определил, что они падают на землю с одинаковым ускорением.

- Каков характер движения тел, падающих с высоты? Почему?
- Какой важный результат был получен из проведенных Галилеем экспериментов?

### Исследование-1. Какова причина одновременного падения тел?

**Оборудование:** трубка Ньютона, насос Камовского, резиновый шланг.

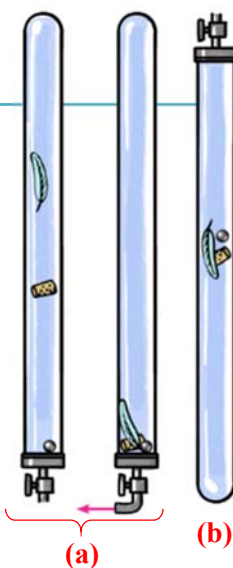
**Описание прибора:** трубка Ньютона – это толстостенная широкая стеклянная трубка, длиной около 1 м, запаянная с одного конца и имеющая кран на другом конце. В трубку помещено три тела разных размеров и веса: дробь, пробка и перо птицы (b).

**Ход исследования:**

1. Пронаблюдайте последовательность падения тел на дно трубки, находящейся в вертикальном положении, при переворачивании ее на  $180^\circ$  (см: a).
2. Подсоединив кран трубки к насосу, откачайте из нее воздух. Закрыв кран, повторите опыт и проследите процесс свободного падения тел на дно трубки (b).

**Обсуждение результатов:**

- Что необычного наблюдается при падении тел на дно трубки после того, как из нее откачали воздух?
- К какому выводу о характере движения можно прийти из опыта свободно падающих тел?

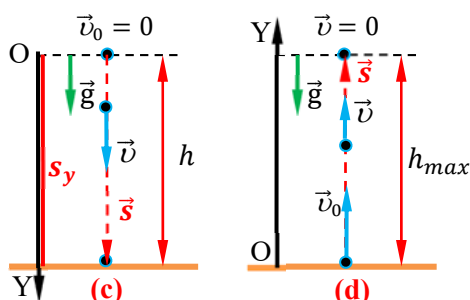


На Земле свободное падение – наиболее распространенное равнопеременное движение тел. *Свободное падение* – это падение тел, поднятых над поверхностью Земли, без опоры и подвеса.

- *Свободное падение – это движение тел под действием только силы тяжести. Это движение является равноускоренным с ускорением  $g$  без начальной скорости ( $v_0 = 0$ ).*

Впервые свободное падение было изучено в конце XVI века итальянским ученым Галилео Галилеем. Исследуя движение разных шариков (изготовленных из дерева, железа и слоновой кости) по наклонной плоскости, он определил, что эти тела, отличающиеся друг от друга по массе, движутся с одинаковым ускорением. Было установлено, что при изменении угла наклона плоскости, значения ускорений для всех трех тел остаются одинаковыми. Вывод, полученный Галилеем: *Земля всем телам, находящимся в данной*

части ее поверхности, сообщает одинаковое ускорение. Проведенные измерения показали, что это ускорение, называемое *ускорением свободного падения*, у поверхности Земли равно  $\approx 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ . В последующем, из многочисленных измерений, было определено, что значение ускорения свободного падения на полюсе Земли равно  $\approx 9,83 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ , а на экваторе  $\approx 9,78 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .



Вектор ускорения свободного падения  $\vec{g}$  всегда направлен вертикально вниз, к центру Земли. При свободном падении тело движется равноускоренно. При этом направление ускорения свободного падения совпадает с направлением вектора скорости. Если выбранная координатная ось направлена вдоль движения, то проекция ускорения на ось будет иметь положительное значение (c).

Опыты показывают, что и тела, брошенные вертикально вверх, движутся с ускорением свободного падения. Так, тела, брошенные вверх, движутся равнозамедленно. Если выбранная координатная ось направлена вдоль движения, то проекция ускорения на ось будет иметь отрицательное значение, так как направление вектора ускорения свободного падения будет направлено против оси координат (d).

Таким образом, как при свободном падении тела, так и при движении тела, брошенного вертикально вверх, полностью выполняются формулы, полученные на предыдущих уроках (смотри: таблица 1.4).

Таблица 1.4.

Кинематические уравнения равнопеременного движения: вектор и проекция	Свободное падение тела с высоты $h$	Движение тела, брошенного вертикально вверх
$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{g}t$ $\vec{s} = \vec{v}_0 t + \frac{1}{2} \vec{g}t^2$ $v_y = \pm v_{0y} \pm gt$ $s_y = \pm v_{0y}t \pm \frac{gt^2}{2}$	<p>Так как при движении тела вертикально вверх или вниз перемещение равно пути <math>h</math>, то для простоты записи уравнений принимаются <math>v_y = v, s_y = h</math> и <math>v_{0y} = v_0</math>:</p>	
	$v = v_0 + gt,$ $h = v_0 t + \frac{gt^2}{2}; h = \frac{v^2 - v_0^2}{2g}.$ <p>При <math>v_0 = 0</math></p> $v = gt; h = \frac{gt^2}{2}.$	$v = v_0 - gt,$ $h = v_0 t - \frac{gt^2}{2}.$ <p>Так как скорость тела при достижении максимальной высоты полета равна нулю (<math>v = 0</math>), то:</p> $v_0 = gt.$

#### Творческое применение. Исследование-2. Можете ли доказать?

**Докажите, что:** 1) время подъема тела, брошенного вертикально вверх на максимальную высоту определяется формулой:

$$t_{\text{подъема}} = \frac{v_0}{g};$$

**Примечание:** примите во внимание, что при достижении тела максимальной высоты, его конечная скорость равна нулю.

2) максимальная высота подъема тела определяется формулой:

$$h_{\max} = \frac{v_0^2}{2g};$$

3) время падения тела определяется формулой:

$$t_{\text{падения}} = \sqrt{\frac{2h}{g}};$$

4) конечная скорость свободно падающего тела в момент удара о землю определяется формулой:

$$v_{\text{кон}} = \sqrt{2gh};$$

**Примечание:** принять во внимание, что  $v_0 = 0$ .

5) время падения тела на поверхность Земли равно времени подъема его на максимальную высоту:  $t_{\text{падения}} = t_{\text{подъема}}$ .

#### Обсуждение результатов:

- Постройте графики зависимостей: скорости от времени и перемещения от времени для тела, свободно падающего с высоты  $h$ .
- Постройте графики зависимостей: скорости от времени и высоты от времени для тела, брошенного вертикально вверх.

#### Применение в повседневной жизни:

- Каждый раз, когда идет дождь, наблюдается следующее: капля дождя, пройдя расстояние между облаком и Землей 2 км, падает на нас со скоростью  $7 - 8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . С какой скоростью падали бы на нас капли, если бы не было сопротивления воздуха и была ли бы такая скорость опасной для нашей жизни? Почему?

#### Провести самооценку:

1. Какие понятия повторили на уроке? Что из этого вы хорошо поняли, а что осталось вам не ясным?
2. Тело свободно падает с высоты 45 м ( $v_0 = 0, g = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ , сопротивление воздуха не учитывать). Определите:
  - а) Чему равно время падения тела?
  - б) Чему равна конечная скорость тела?
  - в) На какой высоте окажется тело в момент времени  $t = 2,5$  с?
3. Вычислите путь, пройденный свободно падающим телом за 1 с, за 2 с, за 3 с и 4 с ( $v_0 = 0, g = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ , сопротивление воздуха не учитывать). Запомните полученные числа, в дальнейшем они понадобятся для устного решения определенного типа задач.

#### ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?

1. Напишите короткое объяснение данных физических понятий: “свободное падение”, “ускорение свободного падения”.
2. Напишите уравнения движения тела, падающего с определенной высоты, и тела, брошенного вертикально вверх.

## 1.7

## ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ МЕХАНИЧЕСКОГО ДВИЖЕНИЯ



Два автомобиля движутся по шоссе со скоростями  $v_1 = 60 \frac{\text{км}}{\text{час}}$  и  $v_2 = 90 \frac{\text{км}}{\text{час}}$ , соответственно.

- В каком случае произойдут наибольшие повреждения при столкновении этих автомобилей: если они движутся навстречу друг другу, или при ударе сзади едущим в том же направлении автомобилем? Почему?

### Исследование-1. Почему тело обладает разными по модулю скоростями?

**Задача 1:** Эскалатор метро поднимает стоящих на его ступеньках пассажиров со скоростью 3 м/с. Один из пассажиров поднимается в направлении движения эскалатора со скоростью 2,5 м/с относительно него. Чему равен модуль скорости пассажира относительно земли? Чему будет равен модуль скорости этого пассажира относительно земли, если он будет двигаться вниз в направлении, противоположном движению эскалатора с той же скоростью (Физика – 7 класс, “Относительность движения”)?

#### Обсуждение результатов:

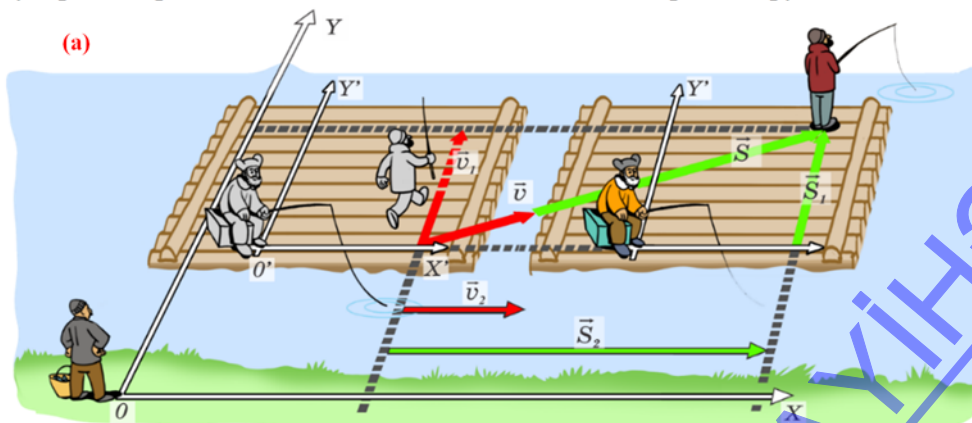
- Почему для модуля скорости пассажира относительно земли получают разные значения при его движении по и против направления движения эскалатора?
- К какому выводу об абсолютном значении скорости можно прийти?

Как вы уже знаете, положение материальной точки (или тела) в пространстве зависит от выбранной системы отсчета, то есть относительно разных систем отсчета положение материальной точки может быть разным. Это означает, что положение тела в пространстве относительно. Относительно не только положение тела, но и его движение:

- *Перемещение и скорость тела в различных системах отсчета, движущихся относительно друг друга, будут иметь различные значения.*

Исследуем относительность движения при помощи решения нижеприведенной задачи.

**Задача 2.** Два рыбака находятся на плоту, движущемся по течению реки (а). Один из рыбаков, сидя на ящике, ловит рыбу, другой же движется перпендикулярно направлению движения плота с одного его края на другой.



Определите перемещение и скорость второго рыбака относительно наблюдателя, стоящего на берегу.

**Решение.** Исследуем движение второго рыбака с разных позиций. С этой целью используем две системы отсчета:

**Неподвижная система отсчета (ХОУ)** – связанная с наблюдателем на берегу. Она неподвижна относительно Земли.

**Подвижная система отсчета (Х'О'У')** – связанная с сидящим рыбаком. Она связана с плотом, движущимся со скоростью течения реки (см: **а**).

Сидящий рыбак является телом отсчета в движущейся системе отсчета. Ему кажется, что его товарищ переходит с одного края плота на другой со скоростью  $\vec{v}_1$  и совершает перемещение  $\vec{s}_1$ . В это время плот вместе с сидящим рыбаком совершает перемещение  $\vec{s}_2$  со скоростью  $\vec{v}_2$  относительно наблюдателя в неподвижной системе отсчета. Таким образом, по правилу сложения двух векторов методом параллелограмма получаем, что результирующее перемещение  $\vec{s}$  второго рыбака относительно неподвижной системы отсчета равно сумме перемещений  $\vec{s}_1$  и  $\vec{s}_2$ .

$$\vec{s} = \vec{s}_1 + \vec{s}_2. \quad (1.31)$$

Если каждую из двух сторон выражения (1.31) разделим на время движения  $t$ , то получим:

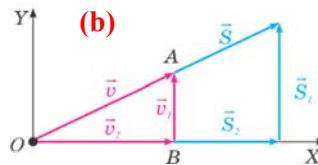
$$\frac{\vec{s}}{t} = \frac{\vec{s}_1}{t} + \frac{\vec{s}_2}{t}.$$

Отсюда получим обобщенный закон сложения скоростей:

$$\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2. \quad (1.32)$$

• Скорость движения тела ( $\vec{v}$ ) относительно неподвижной системы отсчета равна геометрической (векторной) сумме скорости этого тела ( $\vec{v}_1$ ) относительно подвижной системы отсчета и скорости ( $\vec{v}_2$ ) подвижной системы относительно неподвижной.

Используя закон сложения скоростей, вычисляется скорость шагающего по поверхности плота рыбака относительно наблюдателя, стоящего на берегу. Как видно по чертежу, скорости  $\vec{v}_1$  и  $\vec{v}_2$  перпендикулярны друг к другу и образуют катеты прямоугольного треугольника  $\Delta OAB$ , а гипотенуза этого треугольника образует результирующую скорость (**б**). По теореме Пифагора для численного значения скорости имеем:



$$v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}.$$

**Творческое применение. Исследование-2. Проверка закона “Сложение скоростей”.**

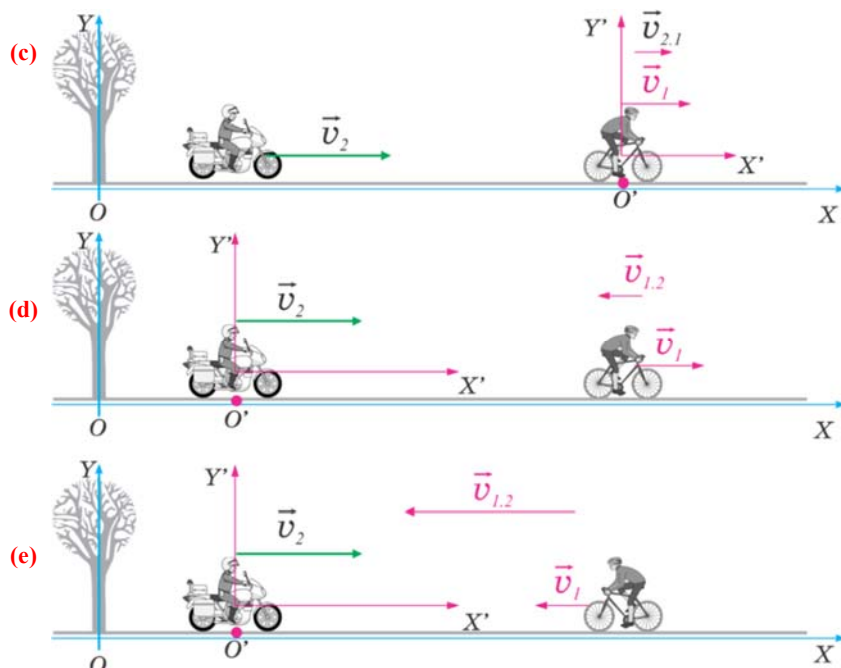
**Задача 3:** Велосипедист движется по прямолинейному участку дороги со скоростью 10 м/с, за ним в том же направлении движется мотоциклист со скоростью 25 м/с (**с**). Определите:

- модуль скорости  $\vec{v}_{21}$  мотоциклиста относительно велосипедиста;
- модуль скорости  $\vec{v}_{12}$  велосипедиста относительно мотоциклиста.

**Примечание:** Запишите формулу сложения векторов скорости. Решите уравнение в проекциях скоростей на координатную ось  $OX$  (см: **с** и **д**).

**Задача 4.** Велосипедист и мотоциклист движутся с данными скоростями (см.: задача 3) навстречу друг другу. Определите модуль скорости  $\vec{v}_{12}$  велосипедиста относительно мотоциклиста.

**Примечание:** Запишите формулу сложения векторов скорости. Решите уравнение в проекциях скоростей на координатную ось  $ox$  (см.: е).



#### Обсуждение результатов:

- Как можно определить модуль скорости  $\vec{v}_{21}$  мотоциклиста относительно велосипедиста, зная скорости мотоциклиста и велосипедиста, движущихся в одном и том же направлении относительно земли?
- Как можно определить модуль скорости  $\vec{v}_{12}$  велосипедиста относительно мотоциклиста, движущихся навстречу друг другу? Ответ обоснуйте.

#### Применение в повседневной жизни:

- Как можно определить скорость пассажира относительно земли, зная скорость пассажира относительно движущегося поезда и скорость поезда относительно земли?

#### Провести самооценку:

1. Какие понятия повторили на уроке? Что из этого вы хорошо поняли, а что осталось вам не ясным?
2. Что означает выражение “Механическое движение относительно”?
3. Что подразумевается под неподвижной и подвижной системами отсчета?
4. Как выражается общий закон сложения скоростей?
5. Относительно каких небесных тел, соответственно, определяется положение тел на основе геоцентрического и гелиоцентрического мировоззрения? Ответ обоснуйте. Кто основатели этих мировоззрений?
6. Моторная лодка на путь из одного пункта до другого, плывя по течению реки, затрачивает время, равное 40 минутам, а при движении против течения реки затрачивает 1 час 10 минут. Чему равен модуль скорости лодки относительно воды, если модуль скорости течения реки 8 км/час?

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Дайте определения нижеприведенных понятий: “неподвижная система отсчета”, “подвижная система отсчета”, “относительность движения”, “закон сложения скоростей”.



## 1.8 Равномерное движение по окружности

На предыдущих уроках вы ознакомились с различными видами прямолинейного движения, с величинами, характеризующими эти движения, и определили, как изменяются эти величины со временем.

- Какое из движений, прямолинейное равномерное и прямолинейное равнопеременное, имеет ускорение, а какое нет? Почему?
- Что характеризует ускорение при прямолинейном поступательном движении: быстроту изменения модуля или направления скорости, или обеих величин сразу?
- Что характеризует ускорение при равномерном движении по окружности? Выскажите свои предположения.

Наиболее простой вид криволинейного движения – это широко распространенное в природе и технике движение по окружности (см.: физика-7, темы: 1.6 и 1.7). Вращение точек поверхности Земли вокруг своей оси, точек часовых стрелок, точек автомобильных колес и др. является движением по окружности. Теоретическая и практическая важность изучения движения по окружности заключается в том, что произвольную криволинейную траекторию можно представить как сумму дуг окружностей разных радиусов (а). Самый простой вид движения по окружности – это *равномерное движение*.

• *Равномерное движение по окружности – это движение, при котором модуль скорости материальной точки в каждой точке этой окружности остается неизменным.* Такое движение характеризуется следующими величинами:

**Период обращения** – это время, затраченное на один полный оборот материальной точки по окружности:

$$T = \frac{t}{N}.$$

Где  $T$  – период обращения,  $N$  – число полных оборотов материальной точки за время  $t$ . За единицу периода обращения в СИ принята секунда:  $[T] = 1\text{ с}$ .

**Частота обращения** – это число оборотов материальной точки по окружности, совершаемых за единицу времени:

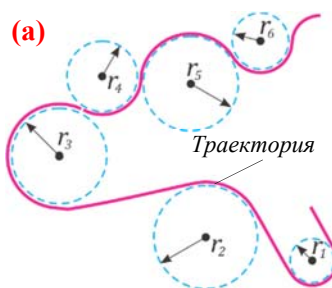
$$\nu = \frac{N}{t}.$$

Где  $\nu$  – частота обращения (иногда обозначается буквой  $n$ ). За единицу частоты обращения в СИ принят 1 герц – частота такого обращения, когда тело за секунду совершает один полный оборот:

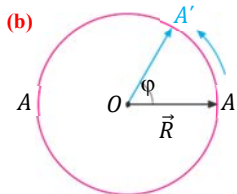
$$[\nu] = \frac{1}{\text{с}} = \text{с}^{-1} = 1 \text{ Гц}.$$

Период и частота обращения обратно пропорциональны друг другу:

$$\nu = \frac{1}{T}; \quad T = \frac{1}{\nu}.$$



Это означает, что во сколько раз уменьшится частота обращения, во столько же раз увеличится период обращения, и наоборот.



**Угол поворота** – это угол, на который поворачивается радиус-вектор при движении материальной точки по окружности. Угол поворота измеряется отношением длины дуги окружности между начальным и конечным радиус-векторами к радиусу окружности (b):

$$\varphi = \frac{l}{R}.$$

Где  $\varphi$  – угол поворота,  $l$  – длина дуги, соответствующая углу поворота,  $R$  – радиус окружности. Углы поворота радиус-вектора материальной точки, движущейся равномерно по окружности, за равные промежутки времени одинаковы.

Угол поворота является скалярной величиной, единица его измерения в СИ – радиан:  $[\varphi] = 1 \text{ рад}$ .

• 1 рад – это угол поворота радиус-вектора, соответствующий дуге, длина которой равна радиусу окружности ( $l=R$ ).

**Угловая скорость** – это физическая величина, измеряемая отношением угла поворота к промежутку времени, за которое этот поворот совершен:

$$\omega = \frac{\varphi}{t}.$$

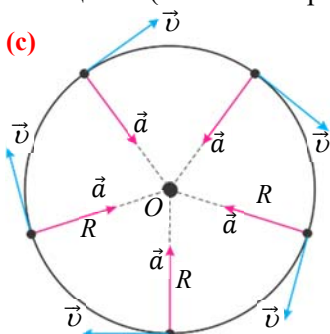
Угловая скорость материальной точки, равномерно движущейся по окружности, с течением времени остается неизменной ( $\omega = \text{const}$ ). Единица угловой скорости в СИ – радиан в секунду:

$$[\omega] = 1 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

• За единицу угловой скорости принята угловая скорость такого равномерного движения по окружности, при котором за 1 секунду радиус-вектор материальной точки поворачивается на угол в 1 радиан.

Материальная точка, движущаяся равномерно по окружности, за время, равное периоду обращения ( $t = T$ ), совершает один полный оборот, за это время радиус-вектор поворачивается на угол  $\varphi = 2\pi$ . Поэтому при равномерном движении по окружности между угловой скоростью и периодом обращения (частотой обращения) имеется связь:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \nu.$$



**Линейная скорость.** Скорость движения материальной точки по окружности называется **линейной скоростью**. Линейная скорость материальной точки, равномерно движущейся по окружности, оставаясь постоянной по модулю ( $v = \text{const}$ ), непрерывно изменяется по направлению и в любой точке направлена по касательной к траектории (c).

Численное значение линейной скорости при равномерном движении по окружности равно отношению пройденного пути ко времени, затраченному на его прохождение:

$$v = \frac{l}{t}.$$

Материальная точка, двигаясь равномерно по окружности, за время, равное периоду обращения ( $t = T$ ), проходит путь, равный длине круга:  $l = 2\pi R$ . Приняв это во внимание в формуле линейной скорости, получим выражение, связывающее линейную скорость с угловой скоростью:

$$v = \frac{2\pi}{T} R = \omega R.$$

**Центростремительное ускорение.** Быстрота изменения направления линейной скорости при равномерном движении по окружности характеризуется физической величиной называемой *центростремительным*, или *нормальным*, ускорением. Вектор центростремительного, или нормального, ускорения в любой точке траектории направлен по радиусу к центру окружности (см.: с). Модуль центростремительного ускорения материальной точки при равномерном движении по окружности равен отношению квадрата линейной скорости к радиусу окружности:

$$a = \frac{v^2}{R}.$$

#### Творческое применение. Исследование. Можете ли доказать?

Докажите, что:

- 1) линейная скорость при равномерном движении по окружности связана с частотой обращения формулой:

$$v = 2\pi \nu R.$$

- 2) центростремительное ускорение при равномерном движении по окружности связано с периодом и частотой обращения и числом оборотов по формулам:

$$a = \frac{4\pi^2 R}{T^2}; \quad a = 4\pi^2 \nu^2 R, \quad a = \frac{4\pi^2 N^2}{t^2} R.$$

- 3) центростремительное ускорение при равномерном движении по окружности связано с угловой и линейной скоростью формулой:

$$a = \omega v.$$

#### Обсуждение результатов:

- Постройте графики зависимости линейной скорости материальной точки, равномерно движущейся по окружности, от радиуса окружности, периода и частоты обращения.
- Постройте графики зависимости центростремительного ускорения материальной точки, равномерно движущейся по окружности, от радиуса окружности, периода и частоты обращения.

#### Применение в повседневной жизни:

- Длина секундной стрелки наручных часов 2 см, а длина минутной стрелки 1,5 см. Конец какой из стрелок движется с большим центростремительным ускорением и на сколько?
- Где в повседневной жизни можно встретить равномерное движение по окружности? Что можно сказать о периоде и частоте их обращения?

#### Провести самооценку:

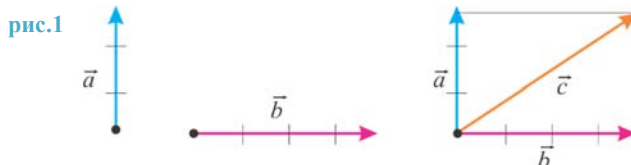
1. Какие понятия повторили на уроке? Что из этого вы хорошо поняли, а что осталось вам неясным?

- Почему ускорение при равномерном движении тела по окружности называется центростремительным, или нормальным ускорением?
- Вычислите модуль центростремительного ускорения Земли, вращающейся вокруг Солнца (радиус орбиты Земли  $R = 1,5 \cdot 10^8$  км).
- С какой линейной скоростью вращается Земля вокруг Солнца (радиус орбиты Земли  $R = 1,5 \cdot 10^8$  км)?

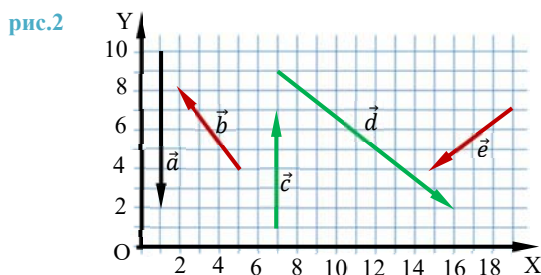
**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Дайте определения нижеприведенных понятий и величин: “угол поворота”, “угловая скорость”, “линейная скорость”, “центростремительное ускорение”, “период вращения”, “частота вращения”.

• **ПРОЕКТ** • Постройте “КАРТУ ПОНЯТИЙ” равномерного движения по окружности.

- Определите координаты материальной точки на плоскости XOY, зная, что модуль его радиус-вектора, образующего с осью OX угол  $30^\circ$ , равен 5 м.
- Координаты материальной точки М равны  $x_M = 1$  м и  $y_M = 1,5$  м, а координаты точки N равны  $x_N = 3$  м и  $y_N = -2$  м. Определите:
  - модуль вектора, соединяющего точки М и N;
  - проекции этого вектора на оси OX и OY;
  - угол между этим вектором и осью OX.
- Векторы  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$  взаимно перпендикулярны (рис.1). Определите:
  - резльтирующий вектор;
  - модуль результирующего вектора.



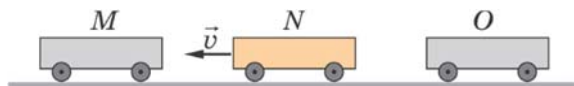
- Определите проекции представленных на рисунке (рис.2) векторов на координатные оси OX и OY.



- Спортсмен, бегая во время тренировки по круговой траектории радиусом 60 м, пробежал 10 кругов. Определите путь, пройденный спортсменом. Чему равен модуль его перемещения ( $\pi = 3$ )?

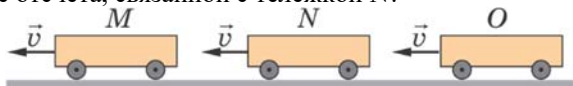
- 1.6. Определите пройденные пути и модули перемещения конца часовой стрелки часов длиной 8 см, соответствующие промежуткам времени  $t_1 = 3$  часа;  $t_2 = 6$  часов;  $t_3 = 9$  часов;  $t_4 = 12$  часов ( $\pi = 3$ ).
- 1.7. Тележки М и О находятся в состоянии покоя, а тележка N движется относительно Земли (рис.3). Что можно сказать о положении тележек М и О в системе отсчета, связанной с тележкой N?

рис.3



- 1.8. Все три тележки М, N и О движутся в одинаковом направлении и с одинаковой скоростью относительно земли (рис.4). Что можно сказать о положении тележек М и О, в системе отсчета, связанной с тележкой N?

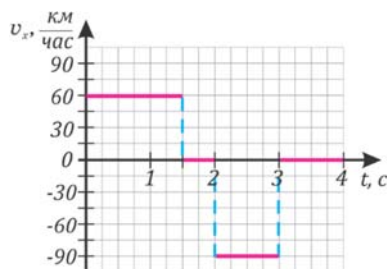
рис.4



- 1.9. Велосипедист движется со скоростью 10 м/с сначала 3 км на север, а затем 4 км на восток. Определите:
- время, затраченное велосипедистом на весь пройденный путь;
  - модуль его перемещения.
- 1.10. Выразите значения указанных скоростей в  $\frac{\text{м}}{\text{с}}$ :  $v_1 = 180 \frac{\text{км}}{\text{час}}$ ;  $v_2 = 2,4 \frac{\text{км}}{\text{мин}}$ ;  $v_3 = 16 \frac{\text{км}}{\text{с}}$ ;  $v_4 = 120 \frac{\text{см}}{\text{с}}$ .

- 1.11. Футболист перемещается по полю с постоянной скоростью  $v = 5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  сначала на юг  $l_1 = 20$  м, затем на запад  $l_2 = 40$  м, а потом на север  $l_3 = 30$  м. Определите: а) путь, пройденный футболистом; б) модуль его перемещения; в) время, за которое он вернется в первоначальное положение по прямой линии с той же скоростью.

рис.5

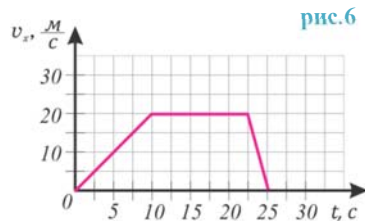


- 1.12. На рисунке дан график зависимости проекции скорости материальной точки от времени (рис.5). Опишите движения, соответствующие графику. Определите: а) модуль перемещения; б) путь, пройденный за промежуток времени 0–4 часов; в) модуль его ускорения.
- 1.13. Вертолет летит из Баку на “Нефтяные Камни”. Модуль его скорости относительно воздуха  $v_1 = 108$  км/час. Модуль скорости ветра, дующего против направления движения вертолета,  $v_2 = 10$  м/с. Определите: а) модуль скорости вертолета относительно Земли; б) его перемещение относительно Земли за 30 мин. Нарисуйте схему движения.

- 1.14. Решите предыдущую задачу для случая, когда ветер дует в направлении, перпендикулярном направлению движения вертолета. Нарисуйте схему движения.
- 1.15. Поезд, приближаясь к станции, в течение 2-х минут уменьшает скорость с  $v = 72$  км/час до нуля. Определите направление и модуль ускорения поезда.

1.16. На основе графика (рис.6) зависимости проекции скорости прямолинейного движения автомобиля от времени определите его:

- скорость, соответственно, в моменты времени  $t_1 = 5$  с,  $t_2 = 18$  с,  $t_3 = 22,5$  с;
- среднюю скорость на всем пути;
- проекцию ускорения в конце 15-й секунды.

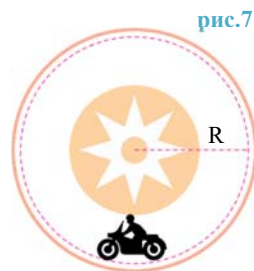


1.17. Камень бросают вертикально вверх с высоты 10 м с начальной скоростью  $30 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Определите пройденный путь и перемещение камня за 4 с (сопротивление воздуха не учитывать;  $g = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ )

1.18. Камень, падающий в колодец, достигает его дна через 4 с. Определите:

- глубину колодца;
- скорость камня в момент удара о дно колодца (сопротивление воздуха не учитывать;  $g = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ ).

1.19. Мотоциклист в цирке совершает вращательное движение по стене цилиндрической формы радиусом 4 м (рис.7, вид сверху). Определите его линейную и угловую скорость, зная что центростремительное ускорение мотоциклиста  $25 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .



1.20. Диаметр колеса велосипеда 0,5 м. Какой должна быть частота вращения колеса, чтобы скорость велосипедиста была  $10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  ( $\pi = 3$ )? (сопротивление воздуха не учитывать).



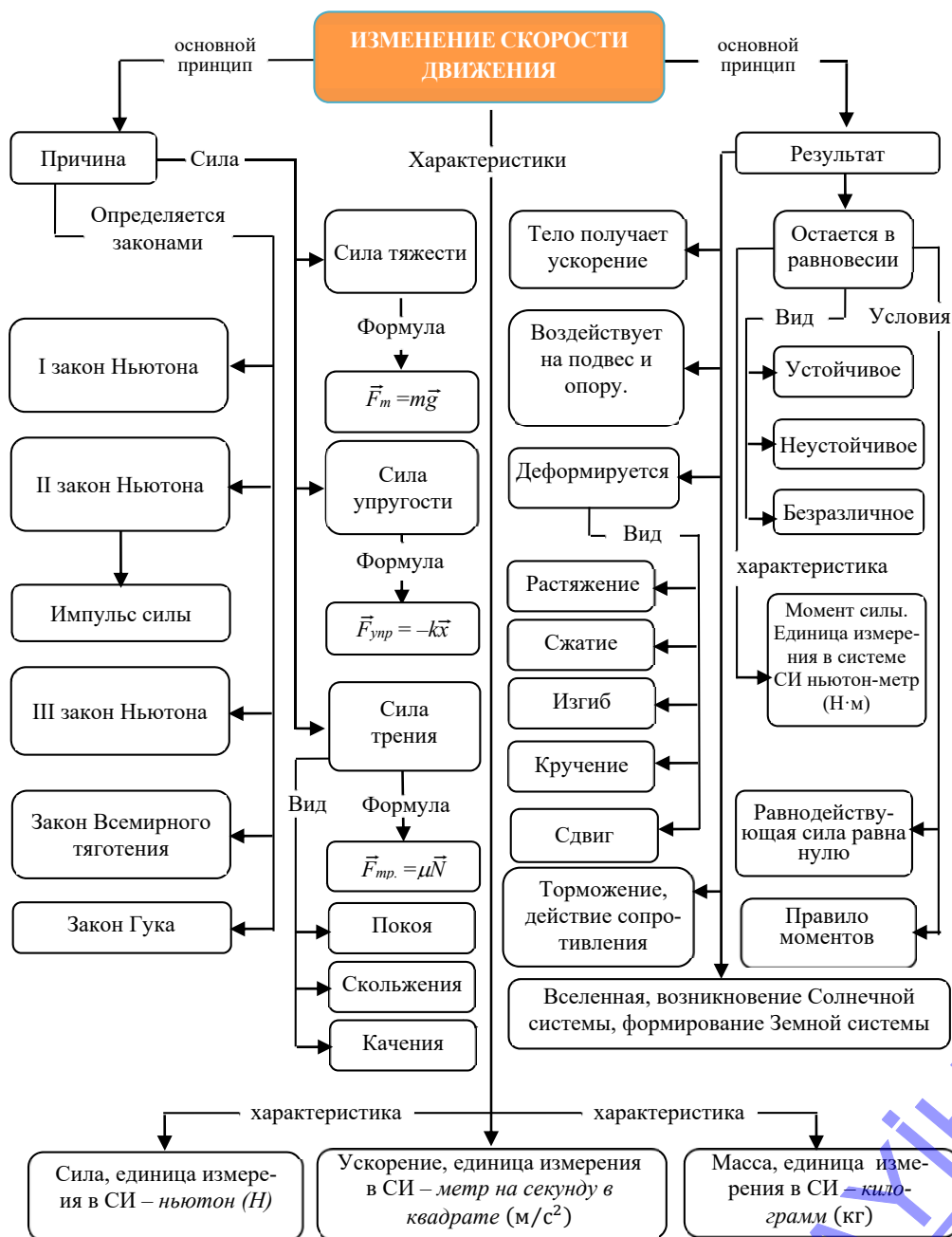
## ОСНОВЫ ДИНАМИКИ

Освоив материалы этой главы –  
**ВЫ СУМЕЕТЕ:**

- объяснить причину возникновения состояния покоя тела или его прямолинейного равномерного движения, демонстрировать простые опыты по этим явлениям;
- комментировать и обосновывать опытами причину изменения скорости тела;
- устно излагать основные законы динамики, записывать выражающие их формулы и обобщать следствия из этих законов;
- различать уравнения движения в динамике от уравнений движения в кинематике;
- составлять и решать количественные и качественные задачи с применением законов Ньютона;
- объяснить возникновение Солнечной системы и причину возможности существования тел на поверхности земного шара;
- устно излагать, обосновывать опытами и применять в повседневной жизни условия равновесия тел;
- различать силы: показывать на схеме точку приложения и направление, записывать формулу зависимости силы от физических величин;
- указать причины, изменяющие характер механического движения, привести примеры различных видов механического движения из повседневной жизни; понять причину происходящих явлений и привести примеры их применения в принципе работ различных приборов и механизмов.

# II

## “Карта понятий” для II главы



## 2.1 Основная задача динамики. СИЛА. РАВНОДЕЙСТВУЮЩАЯ СИЛА. МАССА

Как вы уже знаете, причиной изменения скорости движения произвольного тела является взаимодействие его с другими телами (см.: физика-7).

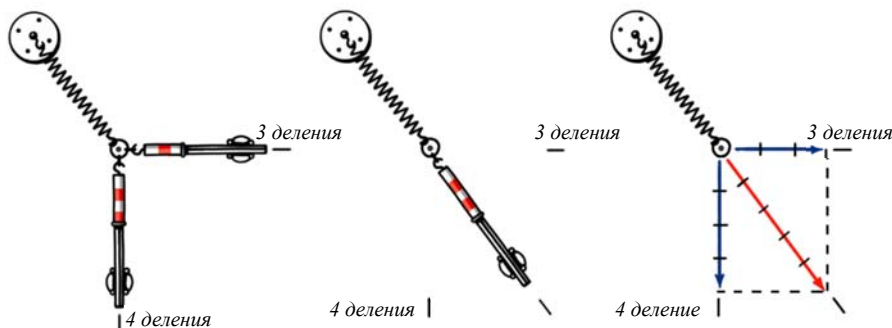
- Должно ли тело подвергаться действию сил, приложенных к нему другими телами, чтобы находиться в состоянии покоя или двигаться прямолинейно и равномерно?
- Должно ли тело взаимодействовать с другими телами, чтобы двигаться равноускоренно?
- Какое свойство тела может играть важную роль при изменении его положения в пространстве?
- Как можно определить, изменяется или нет положение тела, если оно находится под воздействием нескольких одновременно действующих сил?

### Исследование-1. Что означает замена сил равнодействующей?

**Оборудование:** набор “Приборы по статике”, маркер, линейка.

**Ход исследования.**

1. Закрепите один из концов пружины, взятой из набора “Приборы по статике”, с помощью магнитного зажима на металлической пластине. Кольцо на свободном конце пружины растягивается двумя динамометрами так, чтобы образуя друг с другом прямой угол, они показывали растяжения соответственно на 3 и 4 деления.
2. Отметьте конечное положение кольца точкой, а положения динамометров штрихами.
3. Один из динамометров удалите, а другой потяните так, чтобы кольцо совпало с отмеченной точкой. Отметьте на пластине штрихом новое положение динамометра.
4. Удалите динамометр и проведите три штриховые прямые линии, проходящие через отмеченное положение кольца и динамометров. На этих линиях, соответственно показаниям динамометров, постройте три вектора с одинаковыми делениями.
5. Используя действия над векторами, проверьте верность определения направления и модуля результирующего вектора.



### Обсуждение результатов:

- Из суммы каких сил получилась результирующая сила, и скольким делениям соответствует его модуль?
- По какой формуле можно математически определить модуль результирующей силы? Насколько его значение, полученное из этой формулы, соответствует результатам эксперимента?

Изучив учебный материал раздела “Кинематика”, вы научились различать равномерное и равноускоренное движения, а также записать для них уравнения

движения. Однако осталось невыясненным, по какой причине возникает равномерное или равноускоренное движение. Этот вопрос изучается в разделе механики, называемом **динамикой**.

- *Динамика (по-гречески *dinamikos* – “сильный”, “мощный”) – раздел механики, изучающий причины, определяющие характер движения, а также как эти причины изменяют характер движения.*
- *Основная задача динамики – определить характер движения тела в соответствии с действующей на него силой, или наоборот, по характеру движения тела определить, какая сила действует на него.*

Понятие “сила” является основополагающим в динамике. Сила – векторная физическая величина, характеризующая действие одного тела на другое и являющаяся мерой этого действия (см.: физика-7, стр. 30). Направление вектора силы совпадает с направлением действия тела, а его модуль выражает количественную меру действия.

Говоря об определенной силе, необходимо четко представить:

- *на какое тело действует эта сила или к какому телу она приложена?*
- *к какой точке тела, имеющего определенные размеры, прикладывается эта сила?*
- *действие какого тела она характеризует?*
- *вдоль какой линии и куда направлена эта сила?*
- *чему равен её модуль?*

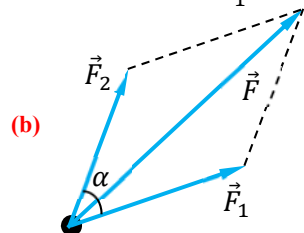
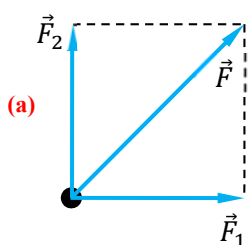
При действии на тело нескольких сил их действие заменяется одной равнодействующей силой.

- *Равнодействующая сила – это векторная сумма всех сил, действующих на тело:*

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \vec{F}_n \dots = \vec{F}_p.$$

Например, если на материальную точку действуют две взаимноперпендикулярные силы  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$ , то они могут быть заменены вектором силы  $\vec{F}$  (а).

Модуль этой силы:  $F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}$ .



Если же на тело действуют две силы  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$  под произвольным углом  $\alpha$  (b), то модуль равнодействующей силы определяется на основании *теоремы косинусов* (см.: математика-9):  $F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2\cos\alpha}$ . Ускорение приобретает телом под действием силы, поэтому в динамике понятие “ускорение” имеет более значимый смысл.

- *Приобретение телом ускорения происходит в результате его взаимодействия с другими телами. Известно, что отношение ускорений двух взаимодействующих тел равно обратному отношению их масс (см.: физика-7, стр. 38):*

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1}.$$

Это соотношение между ускорениями и массами взаимодействующих тел может быть использовано для определения масс тел. Но для этого сначала

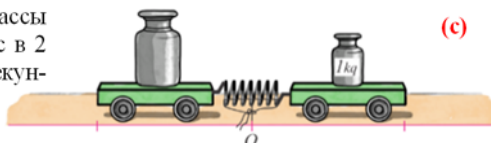
следует выбрать единицу массы – принять массу какого-либо тела за эталон. Затем тело, массу которого необходимо определить, привести во взаимодействие с телом, принятым за эталон. Далее, из соотношения между ускорениями и массами этих тел определяется неизвестная масса тела:

$$\frac{a_{\text{эт}}}{a_{\text{т}}} = \frac{m_{\text{т}}}{m_{\text{эт}}} \rightarrow m_{\text{т}} = m_{\text{эт}} \cdot \frac{a_{\text{эт}}}{a_{\text{т}}}.$$

### Применение. Исследование-2

#### Определение массы

**Оборудование:** тележка (2 шт.), эталон массы (разновес в 1 кг), исследуемое тело (разновес в 2 или 3 кг), демонстрационная линейка (1 м), секундомер, пружина, нить, зажигалка, маркер.



#### Ход исследования:

1. Поместите друг против друга две тележки с помещенными на них разновесами в 1 кг (масса, условно принятая за эталон) и 2 кг, на горизонтальной гладкой поверхности (с). Поместите между тележками сжатую пружину, перевязанную нитью, и отметьте точкой “0” середину пружины.
2. Подожгите нить и одновременно включите секундомер. Измерьте линейкой проекции перемещения (пройденный путь) тележек за определенный промежуток времени  $t$  и вычислите ускорение движения по кинематическим формулам:

$$s = \frac{at^2}{2} \rightarrow a = \frac{2s}{t^2}.$$

3. Определите искомую массу из соотношения ускорений и масс двух взаимодействующих тел, проверьте, соответствуют ли полученные значения масс 2 кг (или 3 кг).
4. Запишите все результаты в таблицу 2.1.

Таблица 2.1

№	$m_{\text{эт}}, \text{кг}$	$S_{\text{т}}, \text{м}$	$S_{\text{эт}}, \text{м}$	$a_{\text{т}}, \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$	$a_{\text{эт}}, \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$	$t, \text{с}$	$m_{\text{т}}, \text{кг}$
1	1 кг						(2 кг)
2	1 кг						(3 кг)

#### Обсуждение результатов:

- В результате действия какой равнодействующей силы тележки получили ускорение? Можете ли показать схематически точку приложения и направление этой силы?
- Какие еще силы действуют на тележки? Какие из них друг друга уравновешивают? Можете ли показать схематически эти силы?

#### Применение в повседневной жизни:

Какие примеры из повседневной жизни о роли масс взаимодействующих тел в приобретении большего (или меньшего) ускорения вы можете привести?

#### Оцените свои знания:

1. Какие понятия повторили на уроке? Что из этого вы хорошо поняли, а что осталось вам не ясным?
2. В чем отличие динамики от кинематики?
3. Какими физическими величинами характеризуется взаимодействие между телами?
4. Что необходимо знать для определения действия силы на тело? Ответ обоснуйте.
5. Что означает равнодействующая всех сил, действующих на тело?
6. Какую роль выполняет масса в приобретении телом ускорения?

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Запишите в рабочем листке определения нижеприведенных понятий: “динамика”, “основная задача динамики”, “сила”, “равнодействующая сила”, “ускорение в динамике”, “масса”.

## 2.2 ДВИЖЕНИЕ ПО ИНЕРЦИИ: I закон НЬЮТОНА

(a)



Возможно, во время летних каникул вы наблюдали или сами пережили описанные ниже явления:

- a) велосипедист равномерно движется по прямой дороге;
- b) велосипедист пытается удержать велосипед в состоянии покоя, не касаясь ногами земли;
- c) из-за невнимательности велосипедист не замечает, как колесо велосипеда сталкивается с камнем, и перелетает через внезапно остановившийся велосипед (a).

- Что является причиной равномерного движения велосипедиста по прямой дороге?
- Что является причиной сохранения велосипедистом состояния равновесия на велосипеде, без касания земли ногами?
- Почему велосипедист при внезапной остановке велосипеда перелетает через него в направлении движения?

### Исследование-1. Почему совершены разные перемещения?

**Оборудование:** желоб Галилея, металлический шарик, пластина из оргстекла, грубая наждачная бумага (номер 12–16), хлопковая ткань, штатив с муфтой и зажимом.

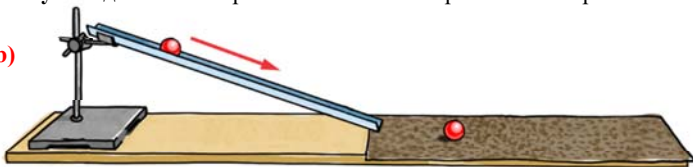
**Ход исследования:** Закрепите желоб в штативе под углом  $30^\circ$  к горизонтальной поверхности. Пронаблюдайте три случая движения шарика по горизонтальной поверхности после прохождения наклонного участка и подумайте о причинах увиденного.

**I случай:** движение шарика по наждачной бумаге на горизонтальной поверхности стола (b);

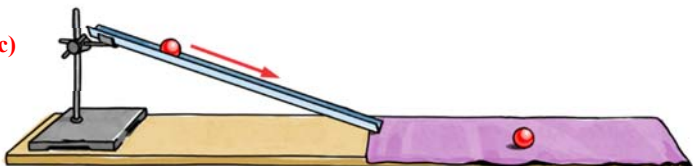
**II случай:** движение шарика по хлопковой ткани на горизонтальной поверхности стола (c);

**III случай:** движение шарика по пластине из оргстекла на горизонтальной поверхности стола (d).

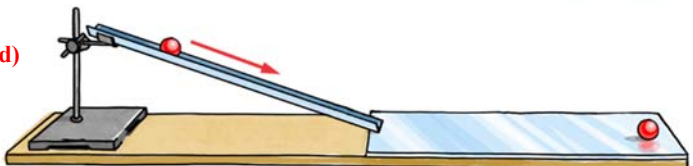
(b)



(c)



(d)



#### Обсуждение результатов:

- По какой поверхности шарик, можно сказать, движется равномерно, а по какой его скорость уменьшается? Почему?



Основу динамики составляют три закона Ньютона. Эти законы – результат обобщения многочисленных наблюдений и экспериментов. Первое обобщение опытов провел Г.Галилей, живший в XVII веке. В результате экспериментов, аналогичных проведенному вами исследованию, он сформулировал *принцип инерции*:

• *Если на какое-либо тело действуют другие тела с силами, компенсирующими друг друга, то это тело либо находится в покое, либо движется равномерно и прямолинейно.*

**Исследование-2. Какие силы компенсируют (уравновешивают) действия друг друга?**

**Задача:** На рисунке представлены три тела: подвешенный на нити покоящийся шарик (e), равномерно летящий вертолёт (f) и равномерно движущийся по прямолинейной горизонтальной дороге велосипедист (g). С какими телами каждый из них, взятый в отдельности, находится во взаимодействии?

Можете ли вы схематически показать действие этих сил (для простоты точку приложения сил сместите в центр тела)?



**Обсуждение результатов:**

- В чем причина нахождения тела в состоянии покоя или равномерного движения?
- Какие силы, действующие на тело, компенсируют друг друга?

Ссылаясь на принцип инерции Галилея, Ньютон сформулировал I закон динамики, называемый также *I законом Ньютона*:

• *Существуют такие системы отсчета, относительно которых тела сохраняют свое состояние покоя или равномерного прямолинейного движения при отсутствии всякого внешнего воздействия на них, или если оказываемые на тело действия компенсируют друг друга.*

Система отсчета, относительно которой выполняется I закон Ньютона, называется *инерциальной системой отсчета (ИСО)*. С достаточно большой точностью системы тел, находящихся в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения относительно Земли, можно считать инерциальными системами отсчета. Например, систему отсчета, связанную с равномерно и прямолинейно движущимся локомотивом, можно принять за инерциальную систему отсчета.

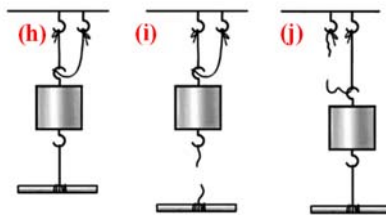
Отметим, что понятие “инерциальная система отсчета” является научной абстракцией. В реальной жизни такой системы не существует, потому что в природе тел в состоянии абсолютного покоя нет.

### Исследование-3. Применение. Почему нить рвется в разных местах?

**Оборудование:** металлический цилиндр 1 кг с крючками на основаниях, нить, штатив, карандаш.

**Ход исследования:**

1. Подвесьте цилиндр к штативу, как показано на рисунке (h). Для создания одинаковых условий обратите внимание на то, чтобы длина нитей, привязанных к верхнему и нижнему крючкам цилиндров, были одинаковы. Для предотвращения падения цилиндра на пол, во время обрыва нити, его крепко привязывают вторым шнуром к основанию подвеса.
2. Чуть-чуть приподнимите вверх карандаш, вдетый в свободный конец нижней нити, и резко потяните ее вниз. Обратите в это время внимание на то, какая из нитей оборвется (i).
3. Заменяя оборванную нить новой, потяните ручку вниз, медленно увеличивая прикладываемую силу. Обратите в это время внимание на то, какая из нитей (верхняя или нижняя) оборвется, и обсудите причину наблюдаемых явлений (j).



**Обсуждение результатов:**

- Почему при резком рывке ручки вниз обрывается нижняя нить?
- При постепенном, очень медленном действии на карандаш обрывается верхняя нить, на которой подвешен цилиндр. Почему?
- Какова связь этих экспериментов с I законом Ньютона?

**Примечание.** Принять во внимание, как проявляется инертность тела и роль продолжительности действия тел друг на друга.

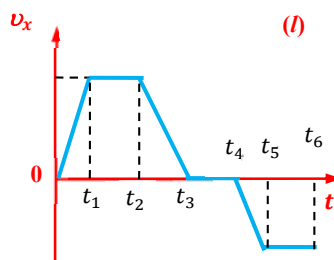
**Применение в повседневной жизни:**

Наверно вы наблюдали такой цирковой номер: на грудь, горизонтально лежащего силача укладывается наковальня (50–60 кг), а его ассистент наносит сильный удар молотом по наковальне (k). Для силача такой удар не представляет никакой опасности, однако он все время остерегается, что для его грудной клетки может возникнуть серьезная опасность. В чем заключается эта опасность?



**Провести самооценку:**

1. Какие понятия повторили на уроке? Что из этого вы хорошо поняли, а что осталось вам не ясным?
2. Почему иногда I закон Ньютона называют законом инерции?
3. На рисунке дан график зависимости проекции скорости тела от времени (l). В каком промежутке времени силы, действующие на тело, компенсируют друг друга?



**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Напишите короткое эссе о нижеприведенных понятиях: “принцип инерции”, “инерциальная система отсчета”, “I закон Ньютона”.

## 2.3

## ОСНОВНОЙ ЗАКОН ДИНАМИКИ: II закон НЬЮТОНА

Вспомните свои ощущения при падении в зимнее время года.

- На какую поверхность падать гораздо опасней: на замерзшую землю или в сугроб рыхлого снега? Почему?

Наверное, вы не раз видели по телевизору, как пожарные спасают людей.

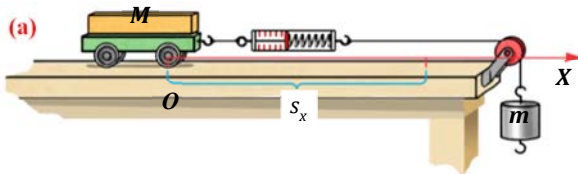
- Почему люди, прыгивая с высоты нескольких этажей на тугο натянутый тент, не получают никаких повреждений?

### Исследование-1. Какова зависимость между ускорением и силой?

**Оборудование:** трибометр, блок, нить, брусок, динамометр, тележка, набор грузиков (по 1 Н), секундомер, весы и разновесы.

**Ход исследования:**

1. Поместите на столе горизонтально трибометр. Положив на его поверхность тележку, поместите на нее брусок. Один из концов динамометра соедините с тележкой, а к другому концу привяжите нить и перебросьте ее через блок. Подвесив к свободному концу нити груз, включите секундомер. Определите следующие величины и запишите результаты измерений в таблицу 2.2 (а):
  - а) промежуток времени  $t_1$  затраченный тележкой на перемещение  $s_x$ ;
  - б) результирующую силу  $F_{1x}$ , действующую на тележку, по показаниям динамометра.
2. Подвесив второй груз к первому грузу, повторите опыт: отметьте в таблице значение промежутка времени  $t_2$ , затраченного тележкой на это же перемещение  $s_x$ , и результирующую силу  $F_{2x}$ , действующую на тележку.



3. Вычислите по формуле  $a = \frac{2s}{t^2}$  ускорения  $a_{1x}$  и  $a_{2x}$ , соответствующие обоим случаям.

Таблица 2.2

№	$s_x$ , м	$M$ , кг	$m$ , кг	$t$ , с	$a_x, \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$	$F_x$ , Н
1	$s_x =$	$M =$	$m_1 =$	$t_1 =$	$a_{1x} =$	$F_{1x} =$
2	$s_x =$	$M =$	$m_2 =$	$t_2 =$	$a_{2x} =$	$F_{1x} =$

#### Обсуждение результатов:

- Какова зависимость между результирующей силой, действующей на тележку, и полученным ею ускорением?

Из исследования было выяснено, что ускорение тела данной массы прямопропорционально результирующей силе, действующей на тело:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{F_1}{F_2}.$$

С другой стороны, тела с разными массами под действием одной и той же результирующей силы получают разные ускорения – ускорения тел обратнопропорциональны их массам:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1}.$$

Ньютон исследовал эту зависимость, и обобщил ее в виде закона. Этот закон, называемый *II законом Ньютона*, выражается следующим образом:

- В инерциальной системе отсчета ускорение, получаемое телом, прямо пропорционально равнодействующей силе и обратно пропорционально массе этого тела:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} \quad (2.1)$$

или

$$m\vec{a} = \vec{F}. \quad (2.2.)$$

Этот закон можно выразить и так: *равнодействующая сил, действующих на тело, равна произведению массы тела на его ускорение*:  $\vec{F} = m\vec{a}$ .

Из II закона Ньютона определяется единица силы в СИ – **ньютон**:

- **1 ньютон** – это сила, под действием которой тело массой 1 кг получает ускорение  $1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ :  $[F] = [m][a] = 1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} = 1 \text{Н}$ .

**Сила является причиной изменения скорости движения!** Как известно из кинематики, ускорение тела – это быстрота изменения его скорости:

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t} \quad (2.3)$$

Приняв во внимание это выражение во II законе Ньютона, получим:

$$\frac{m \cdot (\vec{v} - \vec{v}_0)}{\Delta t} = \vec{F}.$$

Выполнив преобразования, получим:

$$\frac{m\vec{v} - m\vec{v}_0}{\Delta t} = \vec{F} \text{ или } \frac{\Delta(m\vec{v})}{\Delta t} = \vec{F} \quad (2.4)$$

Величина  $m\vec{v}$  – называется **импульсом** (или количеством движения) тела.

- **Импульс** – векторная физическая величина (иначе называемая количеством механического движения), равная произведению массы тела на его скорость. Обозначается буквой  $\vec{p}$ :

$$\vec{p} = m\vec{v} \quad (2.5)$$

Единица измерения импульса в СИ:

$$[p] = [m] \cdot [v] = 1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}.$$

II закон Ньютона также можно выразить и через импульс:

- Изменение импульса (количества движения) тела происходит в направлении равнодействующей силы и пропорционально этой силе:

$$\Delta(m\vec{v}) = \vec{F}\Delta t \quad (2.6)$$

Произведение силы на время ее действия  $\vec{F}\Delta t$  называется **импульсом силы**. Направление импульса силы, также являющейся векторной величиной, совпадает с направлением вектора силы. Единицей импульса силы в СИ является:

$$[F\Delta t] = 1 \text{Н} \cdot \text{с} = 1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}.$$

Таким образом, II закон Ньютона обобщил важный факт динамики:

- Действие силы приводит к изменению скорости тела, т.е. к возникновению ускорения.

**Применение. Исследование-2. Проверим второй закон Ньютона.**

**Задача:** Тело массой 5 кг за промежуток времени 3 с изменило скорость с  $2 \frac{м}{с}$  до  $4 \frac{м}{с}$ .

Определите:

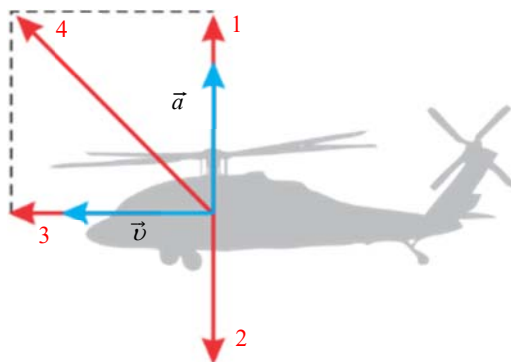
- ускорение тела;
- модуль равнодействующей силы;
- импульс силы, действующей на тело;
- перемещение тела за время, в течение которого произошло изменение скорости.

**Обсуждение результатов:**

- По какой формуле определили ускорение тела?
- Чем отличается равнодействующая сила от импульса силы, действующая на тело?
- Как вы определили перемещение тела?

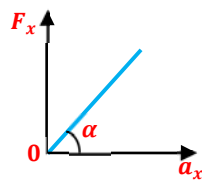
**Применение в повседневной жизни:**

На рисунке представлены направления скорости и ускорения летящего вертолёта. Определите направление действия равнодействующей силы и импульса силы.



**Провести самооценку:**

- Какие понятия повторили на уроке? Что из этого вы хорошо поняли, а что осталось вам не ясным?
- Можно ли на основе формулы II закона Ньютона  $m\vec{a} = \vec{F}$  сказать, что равнодействующая сила зависит от массы тела и его ускорения? Почему?
- Как запишется II закон Ньютона, если на тело одновременно будут действовать четыре силы –  $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3$  и  $\vec{F}_4$ ?
- Может ли скорость тела иметь направление противоположное направлению равнодействующей силы? Ответ обоснуйте примерами.
- Что выражает тангенс угла  $\alpha$  на показанном графике зависимости проекции равнодействующей силы от проекции ускорения?

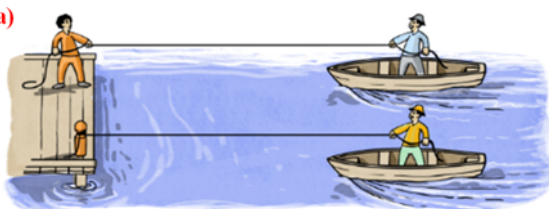


**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Запишите в рабочем листке определения нижеприведенных понятий: “отношение ускорений тела ...”, “II закон Ньютона”, “импульс”, “импульс силы”, “1 ньютон”, “равнодействующая сила, действующая на тело”.

## 2.4 ДЕЙСТВИЕ И ПРОТИВОДЕЙСТВИЕ: III закон НЬЮТОНА

На рисунке изображены две одинаковые лодки, причаливающие к берегу: это достигается с помощью натягивания каната. Так, лодочник в первой лодке тянет за один конец каната, другой конец которого прикреплен к столбику на берегу. Лодочник во второй лодке тянет за конец каната, за другой конец которого тянет человек на берегу (а). Каждый из них прикладывает к концу каната одинаковую силу.

- Какая из лодок быстрее причалит к берегу? Почему?



**Исследование-1.** Что происходит со вторым телом при взаимодействии его с первым телом?

**Оборудование:** демонстрационный динамометр (2 шт.), штатив с муфтой (2 шт.).

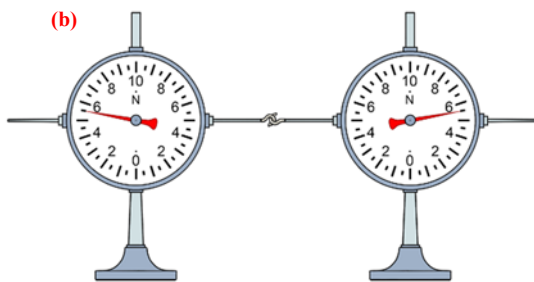
**Ход исследования:** Динамометры закрепляются на штативах вдоль горизонтальной оси. Соединив крючки динамометров, штативы двигают в противоположных направлениях (b).

Проследите в это время за:

- показаниями динамометров;
- направлением смещения стрелок динамометров.

**Обсуждение результатов:**

- Что можно сказать о модулях сил при взаимодействии динамометров друг с другом?
- К какому выводу о направлениях сил действия и противодействия можно прийти, наблюдая направления отклонения стрелок динамометров?



Выполнив исследование, вы установили, что при действии динамометров друг на друга силы взаимодействия по модулю равны, а по направлению противоположны (стрелки отклоняются в противоположные направления):

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2. \quad (2.7)$$

Это равенство выражает *III закон Ньютона*:

- *В инерциальной системе отсчета силы, с которыми два тела действуют друг на друга, равны по модулю и направлены по одной прямой в противоположные стороны.*

Этот закон Ньютона показывает, что при взаимодействии тел друг с другом силы всегда возникают попарно. Это означает, что если на произвольное (первое) тело будет действовать с определенной силой другое (второе) тело, то и первое будет действовать на второе тело с той же по модулю силой, только направленной противоположно. Согласно II закону Ньютона, эти силы сообщают телам ускорения в противоположных направлениях:

$$m_1 \vec{a}_1 = -m_2 \vec{a}_2. \quad (2.8)$$

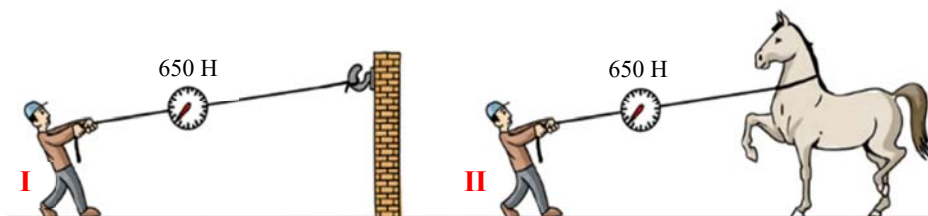
Где  $m_1$  и  $m_2$  – массы взаимодействующих друг с другом тел, соответственно,  $\vec{a}_1$  и  $\vec{a}_2$  – ускорения этих тел. Из III закона Ньютона получаем следующий вывод:

- Силы взаимодействия возникают одновременно и имеют одинаковую природу. Например, силы взаимодействия, возникающие при упругом столкновении тел, оба имеют электромагнитную природу.
- Силы, возникающие при взаимодействии тел, прикладываются к разным телам и поэтому не могут уравновешивать друг друга, то есть никогда не компенсируют друг друга. Компенсировать действия друг друга могут только силы, приложенные к одному телу.

#### Исследование-2. Применение. Какое утверждение верно?

**Задача:** На рисунке представлены два случая:

- а) Мальчик тянет веревку, прикрепленную к стене. В это время динамометр, закрепленный на веревке, показывает силу в 650 Н (I);
- б) Мальчик тянет веревку, закинутую на шею лошади. В это время динамометр, закрепленный на веревке, показывает силу в 650 Н (II). Исследовав изображения, обсудите вопросы:



#### Обсуждение результатов:

- В каком случае мальчик прикладывает гораздо более большую силу: при натягивании веревки, закрепленной на стене или веревки, закинутой на шею лошади? Почему?
- Можете ли показать точку приложения и направление действия сил, возникающих в представленных взаимодействиях мальчик – стена и мальчик – лошадь?

#### Применение в повседневной жизни:

1. Если вы наблюдали плавание рыб в воде, вспомните, как рыба перемещается в воде, отбрасывая воду плавниками. Как возникают силы действия и противодействия, обеспечивающие плавание рыбы, в системе отсчета, связанной с ней? Что можно сказать о точке приложения, направлениях и соотношении между модулями этих сил?
2. Можете ли привести примеры применения III закона Ньютона в явлениях, встречаемых вами в повседневной жизни?

#### Провести самооценку:

1. Какие понятия повторили на уроке? Что из этого вы хорошо поняли, а что осталось вам не ясным?
2. Что общего и чем отличаются между собой силы, возникающие в результате взаимодействия двух тел?
3. Могут ли компенсировать друг друга силы, возникающие в результате взаимодействия тел? Почему?
4. Какую проблему решает III закон Ньютона, которую не могли решить предыдущие два закона?

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Напишите короткое эссе по следующим темам: “действие – противодействие”, “III закон Ньютона”.



## 2.5 ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ

В таблице представлены орбитальные скорости планет и карликовых планет Солнечной системы. Исследуя эту информацию, с легкостью можно определить, что небесные тела этой системы, близко расположенные к Солнцу, имеют более высокую орбитальную скорость.

- Почему небесные тела, двигаясь с такой большой скоростью, не покидают Солнечную систему?

Орбитальная скорость Луны вокруг Земли, по сравнению со скоростями из повседневной жизни, так же очень большая:  $\approx 3682,8$  км/час. Однако эта скорость во много раз меньше скорости Земли вокруг Солнца.

- Почему Луна, покинув околоземную орбиту, не вращается отдельно вокруг Солнца, как карликовая планета?
- Почему мы не чувствуем взаимное притяжение окружающих нас тел?

Планеты и карликовые планеты	Орбитальная скорость	
	км/с	км/час
Меркурий	47,87	172 332
Венера	35,02	126 072
Земля	29,78	107 208
Марс	24,13	86 868
Церера	17,88	64 368
Юпитер	13,07	47 052
Сатурн	9,69	34 884
Уран	6,81	24 516
Нептун	5,43	19 548
Плутон	4,67	16 812
Хаумеа	4,48	16 128
Макемаке	4,41	15 876
Эрида	3,44	12 384

Вы знаете, что все тела во Вселенной, имеющие массу – звезды, галактики, Солнце и планеты, тела Земной системы, молекулы, атомы и другие, взаимно притягиваются друг к другу с силой, называемой *силой тяготения* (или *гравитационной силой*). Исследовав, от каких величин и как зависит эта сила, Исаак Ньютон сформулировал *закон всемирного тяготения*.

- Между любыми двумя материальными точками действует сила взаимного притяжения, прямо пропорциональная произведению их масс и обратно пропорциональная квадрату расстояния между ними:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (2.9)$$

Где  $F$  – модуль силы тяготения (гравитации),  $m_1$  и  $m_2$  – массы материальных точек,  $r$  – расстояние между ними,  $G$  – коэффициент пропорциональности, называемый *постоянной всемирного тяготения* (гравитации) или просто – *гравитационная постоянная*.

Единица гравитационной постоянной в СИ:

$$[G] = \frac{[F] \cdot [r^2]}{[m] \cdot [m]} = 1 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}.$$

- Гравитационная постоянная численно равна силе притяжения друг к другу двух материальных точек массами по 1 кг каждый, если расстояние между ними равно 1 м.

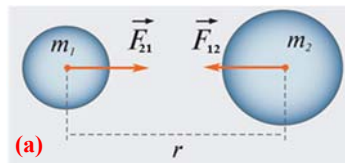
Численное значение гравитационной постоянной опытным путем определил английский ученый Генри Кавендиш (1731–1810) в 1798 году. Это значение одинаково для всех тел во Вселенной вне зависимости от их размеров и масс:

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}. \quad (2.10)$$

Как видно, численное значение гравитационной постоянной очень мало. Поэтому между телами с относительно малыми массами сила притяжения не

чувствуется. Эта сила принимает ощутимые значения при взаимодействии тел с очень большой массой, например, между звездой и планетой, планетой и спутником и т.д.

Сила притяжения между двумя произвольными телами, не являющимися материальными точками при данных условиях, также определяется формулой закона всемирного тяготения. В этом случае эти тела рассматриваются как совокупность материальных точек, вычисляются силы притяжения между всеми материальными точками этих тел, результаты вычислений суммируются и определяются сила притяжения между этими телами. Такие вычисления представляет собой сложную математическую операцию. Однако формула Всемирного тяготения легко применяется для тел шарообразной формы. За расстояние между телами при этом принимается расстояние между их центрами (а). Поэтому для вычисления силы притяжения между произвольным телом и Землей можно применить формулу закона всемирного тяготения. В этом случае расстояние между ними берется до центра Земли:  $r = R + h$ . Силы взаимодействия между Землей и телом,  $\vec{F}_{12}$  и  $\vec{F}_{21}$  направлены вдоль линии, соединяющей эти тела.



Согласно III закону Ньютона  $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$ , их модули равны:

$$F_{12} = F_{21} = F.$$

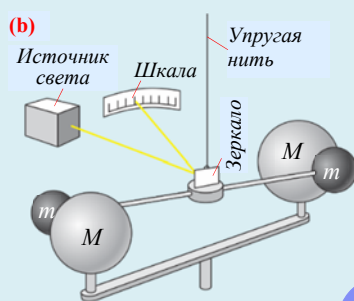
$$F = G \frac{mM}{(R+h)^2}, \quad (2.11)$$

Где  $R$  – радиус земного шара,  $M$  – масса Земли,  $h$  – расстояние от поверхности Земли до центра тела, вдоль радиуса. Для тел, находящихся на поверхности Земли ( $h=0$ ), закон всемирного тяготения записывается в виде:

$$F = G \frac{mM}{R^2}.$$

#### Измерение гравитационной постоянной

С этой целью Г.Кавендиш использовал *крутильные весы*. Схема весов показана на рисунке: на концах стержня длиной 2 м он установил два свинцовых шарика массой по  $m = 729$  г каждый и диаметром приблизительно 5 см. Стержень подвешен на упругой нити. У каждого шарика разместили большие свинцовые шары массами по  $M = 158$  кг. В результате притяжения между большими и малыми шарами нить закручивается на очень небольшой угол. Угол поворота определяется перемещением по шкале светового “зайчика”, отраженного от плоского зеркала, закрепленного на нити, (b).



Зная угол поворота, можно определить силу упругости  $F_{\text{упр}}$ , возникающую в результате закручивания нити. Сила упругости уравнивает силу притяжения между шарами, т.е. эти силы равны по модулю:  $F_{\text{упр}} = F_{\text{тяготения}}$ .

Таким образом, ученый, подставив известные величины в формулу закона всемирного тяготения, получил для гравитационной постоянной значение, очень близкое к его современному значению:

$$[G] = \frac{F_{\text{тяготения}} \cdot r^2}{m \cdot M} = 6,754 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}.$$

**Применение. Исследование.** Умеем ли мы применять закон всемирного тяготения?

**Задача:** Определить на основе информации, приведенной в таблице, между какими двумя небесными телами модуль силы притяжения наибольший, а между какими наименьший?

Небесное тело	Масса небесного тела
A	m
B	4 m
C	2 m
D	3 m

Расстояние между небесными телами			
Тело A		Тело B	Тело C
B	15 R		
C	20 R	5 R	
D	10 R	10 R	25 R

**Обсуждение результатов:**

- От чего зависит сила притяжения между телами?
- К каким результатам пришли после вычислений?

**Применение в повседневной жизни:**

Какие явления, наблюдаемые в повседневной жизни, увиденные по телевизору или известные из других источников, объясняются законом всемирного тяготения?

**Провести самооценку:**

1. Какие понятия повторили на уроке? Что из этого вы хорошо поняли, а что осталось вам не ясным?
2. Два небесных тела массой  $m_1$  и  $m_2$ , на расстоянии  $r$  друг от друга, взаимодействуют с силой, по модулю равной  $F$ . Чему будет равен модуль силы притяжения между этими небесными телами при увеличении расстояния между ними в два раза?
3. Чему равно отношение модулей сил взаимного притяжения  $\frac{F_1}{F_2}$  двух материальных точек с массой  $m_1 = 16$  кг и  $m_2 = 4$  кг? Почему?
4. С какой силой притягиваются друг к другу Земля и Луна (масса Земли  $6 \cdot 10^{24}$  кг, масса Луны  $7 \cdot 10^{22}$  кг, расстояние между ними 384 000 км)?

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Запишите в рабочем листке эссе на следующие темы: “Закон всемирного тяготения”, “Всемирная гравитационная постоянная”, “Измерение всемирной гравитационной постоянной”.

Барон Мюнхгаузен дает научную информацию о своем “большом” открытии: “... из проведенных исследований я определил, что оказывается, все здания на поверхности Земли построены наклонно, как Пизанская башня. Это с легкостью можно проверить при помощи простой треугольной линейки. Только на полюсах и экваторе здания построены относительно прямо.”

Выслушав это “открытие”:



**Бизнесмен** – Этого быть не может! Так как на все здания действует сила притяжения Земли и это действие направлено к центру Земли.



**Инженер** – Не верится! Вертикальность зданий проверяется отвесом. Если бы они были наклонные, то они бы упали.



**Ариф** (ученик 10-го класса) – Я на 100% знаю, что на все тела на поверхности Земли, в том числе на здания, действует сила тяжести. Эта сила сообщает им ускорение свободного падения.

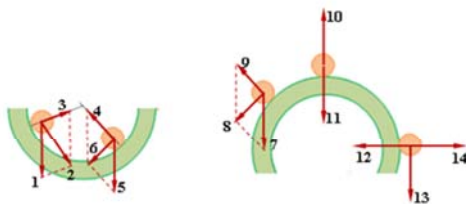
• Какое, по-вашему, предположение правильное: барона, бизнесмена, инженера или Арифа?

#### Исследование-1. Как направлена сила тяжести и ускорение, сообщаемое телу этой силой?

**Задача:** На рисунке представлены положения шарика, движущегося по выпуклой и вогнутой поверхности, в разные моменты времени (а).

Какими цифрами обозначены направления силы тяжести, действующей на шарик, и ускорения свободного падения, сообщаемого шарик у этой силой?

(а)



#### Обсуждение результатов:

- Как вы думаете, к какому телу шарик притягивается сильнее: к Земле, Солнцу или ближайшим телам? Почему?
- Что является причиной возникновения силы тяжести?
- К какой точке прикладывается и как направлена сила тяжести? Чему равен модуль силы

Как вы знаете, по современным научным представлениям взаимное притяжение между телами осуществляется посредством особого вида материи – гравитационного поля (см: физика-6, стр. 77; физика-7, стр. 40). Каждое тело вокруг себя создает гравитационное поле. Как и другие физические поля, гравитационное поле имеет свою силовую характеристику – *напряженность гравитационного поля*.

• **Напряженность гравитационного поля** – это векторная физическая величина, равная отношению силы притяжения, действующей на материальную точку (тело) в гравитационном поле, к его массе:

$$\vec{g}_0 = \frac{\vec{F}}{m}. \quad (2.12)$$

Где  $\vec{g}$  – напряженность гравитационного поля,  $m$  – масса материальной точки (тела),  $\vec{F}$  – сила притяжения, действующая на материальную точку в гравитационном поле.

### От чего зависит модуль напряженности гравитационного поля?

Чтобы ответить на этот вопрос, определим модуль напряженности гравитационного поля для произвольной точки на поверхности Земли и на высоте  $h$  от поверхности Земли:

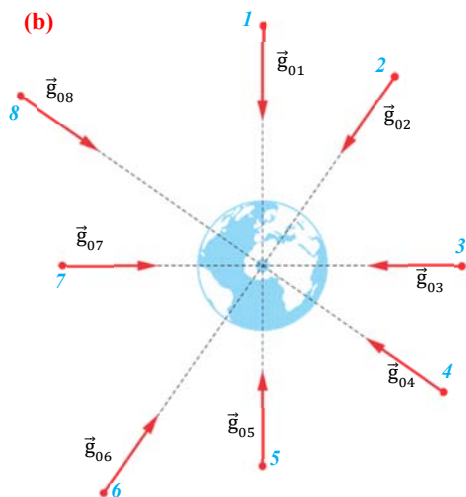
$$g_0 = \frac{F_{\text{Земля}}}{m} = \frac{G \frac{mM}{R^2}}{m} = G \frac{M}{R^2}, \quad (2.13)$$

$$g_h = \frac{F_h}{m} = \frac{G \frac{mM}{(R+h)^2}}{m} = G \frac{M}{(R+h)^2}. \quad (2.14)$$

Здесь  $F_{\text{Земля}}$  и  $F_h$  – силы притяжения на поверхности Земли и на высоте  $h$  соответственно,  $M$  – масса Земли,  $R$  – радиус Земли.

• Модуль напряженности гравитационного поля в некоторой точке прямо пропорционален массе источника данного поля и обратно пропорционален

квадрату расстояния до этой точки. Модуль напряженности гравитационного поля не зависит от массы тела, помещенного в это поле. Вектор напряженности гравитационного поля в произвольной точке поля направлен вдоль радиуса к центру источника поля (b). В данной точке гравитационного поля модуль и направление напряженности гравитационного поля совпадают с модулем и направлением ускорения свободного падения.



Напряженность гравитационного поля направлена вдоль радиуса к центру источника поля.

**Являются ли напряженность гравитационного поля и ускорение свободного падения одной и той же величиной?**

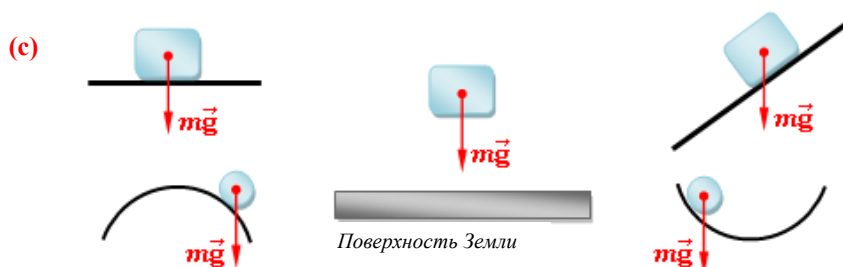
На помещенное в гравитационное поле произвольное тело действует сила притяжения со стороны

источника поля. В результате тело получает ускорение (ускорение свободного падения), направленное к центру источника поля (например, центру Земли). Это ускорение сообщается телу действующей на него силой тяжести гравитационного поля.

• **Сила тяжести** – это сила, с которой Земля (планета) притягивает тела. Сила тяжести равна произведению массы тела, помещенного в гравитационное поле Земли (планеты), на ускорение свободного падения:

$$\vec{F}_a = m\vec{g}. \quad (2.15)$$

Сила тяжести всегда приложена к центру массы тела и направлена вертикально вниз (перпендикулярно к горизонтальной поверхности) к центру Земли (планеты) (с).



Из вышесказанного ясно, что понятия “напряженность гравитационного поля” и “ускорение свободного падения” имеют разный физический смысл. Так, напряженность гравитационного поля появляется в случае возникновения поля, а ускорение свободного падения возникает в результате действия силы тяжести при помещении в это поле произвольного тела (пробное тело).

**Применение. Исследование-2. От чего зависит напряженность гравитационного поля?**

**Оборудование:** линейка, штангенциркуль.

**Ход исследования:** Исследуйте текст и рисунок **б** и определите соотношение между модулями напряженностей гравитационного поля Земли в разных его точках.

**Обсуждение результатов:**

- От чего зависит напряженность гравитационного поля?
- Что общего и в чем различие между понятиями “напряженность гравитационного поля” и “ускорение свободного падения”?

**Применение в повседневной жизни:** Как можно объяснить причину возникновения приливов и отливов в морях и океанах на Земле?

**Провести самооценку:**

1. Какие понятия повторили на уроке? Что из этого вы хорошо поняли, а что осталось вам не ясным?
2. Как изменится модуль ускорения свободного падения, сообщаемого силой тяжести телу при увеличении массы этого тела в 4 раза?
3. Ускорение свободного падения, действующая на тело, помещенное в данную точку гравитационного поля, равно  $7 \frac{m}{c^2}$ . Чему равен модуль напряженности гравитационного поля в той же точке?
4. Каков график зависимости напряженности гравитационного поля от расстояния? Можете ли изобразить этот график?

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Запишите в рабочем листке определения нижеприведенных понятий: “Напряженность гравитационного поля”, “Модуль напряженности гравитационного поля ...”, “Сила тяжести”, “Сила тяжести равна...”, различие в физических смыслах понятий “напряженность гравитационного поля” и “ускорение свободного падения”.



## 2.7 ВЕС И НЕВЕСОМОСТЬ

**Барон Мюнхгаузен** выступил с научным докладом о строительстве необычного многоэтажного здания: "...вес перевернутых небоскребов, которые я построю, с приближением к центру Земли будет уменьшаться. А в центре Земли жители здания будут находиться полностью в состоянии невесомости".

Выслушав этот доклад ...

**Бизнесмен** – Я думаю, что ни о какой невесомости в центре Земли разговор идти не может. Наоборот, там люди будут иметь очень большой вес.

**Инженер** – Наверное, для спуска на лифте к центру Земли понадобится несколько дней.

**Ариф** (ученик 10-го класса) – Я на 100% уверен, что с приближением тела к центру Земли оно будет притягиваться с бесконечно большой силой и люди останутся там навсегда.

- Какое, по-вашему, предположение правильное: барона, бизнесмена, инженера или Арифа? Ответ обоснуйте.

**Исследование-1.** Одинаков ли вес астронавта на всех телах Солнечной системы?

**Задача 1:** Вес астронавта массой 70 кг на Земле равен 686 Н. Изменится ли вес астронавта, если он встанет на весы на поверхности других тел Солнечной системы (а)? Для исследования данной проблемы можно воспользоваться соответствующей информацией о телах Солнечной системы из таблицы (см.: таблица 2.3).

**Примечание.** Как вы знаете, вес тела на горизонтальной поверхности в состоянии покоя, численно равен силе тяжести, действующей на это тело:  $P = mg$  (см.: физика-7, стр. 49).





Таблица 2.3. Некоторые характеристики тел Солнечной системы

Тела Солнечной системы	Ускорение свободного падения на поверхности (м/с <sup>2</sup> )	Среднее расстояние от Солнца (x10 <sup>6</sup> км)	Масса (x10 <sup>24</sup> кг)	Диаметр экватора (км)
Меркурий	3,7	58	0,33	4 880
Венера	8,8	108	4,8	121
Земля	9,8	150	6	12 756
Марс	3,8	228	0,6	6 800
Юпитер	23,5	778	1 877	142 800
Сатурн	11,5	1 426	562	120 660
Уран	9,8	2 869	86	50 800
Нептун	11,6	4 496	102	49 600
Солнце	27,4	–	≈1 989 000	≈1 392 000
Луна	1,6	–	0,074	3 476

#### Обсуждение результатов:

- Как изменяется масса астронавта на поверхности тел Солнечной системы?
- На поверхности какого небесного тела вес астронавта наибольший (наименьший)? Почему?

#### Вес.

• *Вес – это сила, с которой тело вследствие притяжения к Земле действует на опору или подвес.* Вес тела обозначается буквой  $\vec{P}$ . Точка приложения веса находится на опоре (или подвесе). Вес направлен перпендикулярно поверхности опоры или вдоль подвеса. В зависимости от состояния тела его вес может изменяться или оставаться неизменным.

**Случай, когда вес тела не меняется.** Если тело находится в состоянии покоя или движется прямолинейно равномерно по горизонтальной поверхности, то его вес не изменяется. Почему?

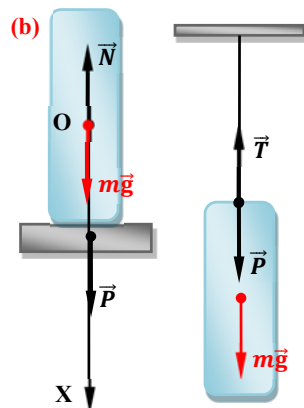
Согласно III закону Ньютона, вес тела действует на опору и равен по модулю и противоположен по направлению силе реакции опоры  $\vec{N}$ . Сила реакции приложена к самому телу (b):  $\vec{P} = -\vec{N}$  (для удобства точка приложения силы реакции опоры смещается в центр тела).

Если тело на подвесе находится в состоянии покоя или вместе с подвесом движется прямолинейно равномерно, то, согласно III закону Ньютона, вес этого тела, действующий на подвес, равен по модулю и направлен противоположно силе натяжения нити  $\vec{T}$ . Сила натяжения прикладывается к самому телу (см. b):  $\vec{P} = -\vec{T}$ .

Согласно II закону Ньютона, уравнение движения для тела, находящегося в состоянии покоя или прямолинейного равномерного движения на горизонтальной опоре, записывается в виде:  $m\vec{a} = \vec{F}$ .

Принимая во внимание, что результирующая сила равна векторной сумме силы тяжести и силы реакции опоры, уравнение движения примет вид:

$$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{N}. \quad (2.16)$$



Для решения уравнения выбирается ось координат, определяются проекции векторов сил на эту ось и, приняв во внимание знак проекций, записывают их в уравнение. За положительное направление оси ОХ выбирается направление действия силы тяжести (см: **б**). Учитывая значения проекций сил на эту ось и равенство нулю ускорения тела ( $\vec{a}=0$ ) в состоянии покоя или прямолинейного равномерного движения, получим уравнение движения тела в следующем виде:

$$0 = mg - N \quad (2.17)$$

Отсюда видно, что вес тела, находящегося в состоянии покоя или прямолинейного равномерного движения, численно равен модулю силы тяжести:

$$N = P = mg \quad (2.18)$$

**Случай, когда вес тела меняется.** Если тело вместе с опорой (или с подвесом) движется с ускорением  $\vec{a}$  в вертикальном направлении, то, в зависимости от направления движения, вес тела увеличивается или уменьшается.

Предположим, что тело вместе с опорой движется вертикально вверх с ускорением  $\vec{a}$ , то есть движется в направлении, противоположном направлению действия силы тяжести. Уравнение движения тела в векторной форме остается без изменения:

$$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{N}.$$

Если направить координатную ось вдоль направления движения (**с**), получим:

$$ma = N - mg \quad (2.19)$$

Отсюда видно, что вес тела, движущегося вместе с опорой вертикально вверх с ускорением  $\vec{a}$  увеличивается. Такое состояние тела называется *перегрузкой*:

$$P = N = ma + mg = m(a + g) \quad (2.20)$$

Ясно, что если тело вместе с опорой будет двигаться в направлении действия силы тяжести, то его вес уменьшится:

$$P = N = m(g - a) \quad (2.21)$$

**Случай, когда вес тела равен нулю – невесомость.** Если тело движется только под действием гравитационной силы, то есть его ускорение будет равно ускорению свободного падения ( $a = g$ ), то вес тела будет равен нулю. Такое состояние тела называется *невесомостью*:

$$P = N = m(g - g) = 0 \quad (2.22)$$

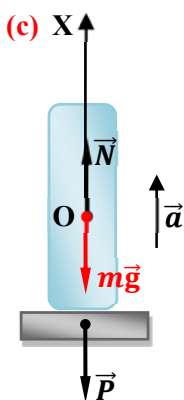
#### Исследование-2. Применение. В каком случае тело действует на подвес с большей силой?

**Задача 2.** Тело массой  $m$ , подвешенное на нити, движется вместе с подвесом с ускорением  $\vec{a}$ . Определите вес этого тела, если система тело-подвес:

- движется в направлении действия силы тяжести;
- движется в направлении, противоположном действию силы тяжести. Представьте движения схематически, сопротивление воздуха не принимать во внимание.

#### Обсуждение результатов:

- Чему равен модуль силы натяжения нити, если система тело-подвес движется в направлении действия силы тяжести?
- Как записывается уравнение движения тела, когда система тело-подвес движется в направлении, противоположном действию силы тяжести?



**Применение в повседневной жизни:**

Представьте себе, что во время поездки на автомобиле в деревню вы столкнулись с необходимостью проехать по горизонтальному деревянному мосту через полноводную реку. На вывеске у обочины дороги отмечено, что мост может выдержать максимальную массу в 1,3 тонны. Масса автомобиля с вами и с грузом равна 1300 кг. Рискнете ли вы, не освобождая автомобиль от груза, переехать мост? С какой скоростью необходимо переехать мост, чтобы его не разрушить? Ответ обоснуйте.

**Провести самооценку:**

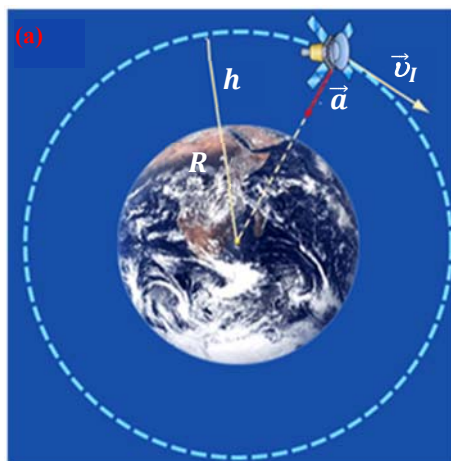
1. Какие понятия повторили на уроке? Что из этого вы хорошо поняли, а что осталось вам не ясным?
2. В каких случаях вес тела и сила тяжести соотносятся как:  
 $a) P = mg;$   $b) P > mg;$   $c) P < mg?$
3. Докажите, что, если тело движется вместе с опорой в направлении действия силы тяжести с ускорением  $\vec{a}$ , его вес равен  $P = N = m(g - a)$ .
4. В каком случае тело находится в состоянии невесомости:  
  - a) спортсмен, прыгающий с трамплина, до погружения в воду;
  - b) опускающийся на землю парашютист;
  - c) пассажир лифта, поднимающегося вверх;
  - d) падающий с балкона цветочный горшок; брошенный вверх мяч.

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Запишите в рабочем листке определения нижеприведенных понятий: “вес”, “сила реакции”, “сила натяжения”, “перегрузка”, “невесомость”.

• **ПРОЕКТ** • С какой скоростью искусственный спутник выводится в космос?

**Задача.** Какую скорость необходимо сообщить телу, чтобы оно, став искусственным спутником планеты массой  $M$  и радиусом  $R$ , вращалось вокруг него по круговой орбите на высоте  $h$  от поверхности планеты?

• Скорость, которую необходимо сообщить телу у поверхности планеты, чтобы превратить его в искусственный спутник этой планеты, вращающийся по круговой орбите, называется **первой космической скоростью**.

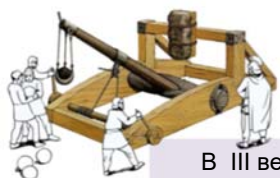


Дано	Решение
<p>Масса планеты – <math>M</math>, радиус планеты – <math>R</math>, высота <math>h</math> от поверхности планеты, на которой движется спутник. <math>v</math> – ?</p>	<p><b>Примечание.</b> Известен характер движения: а) круговая траектория движения; б) линейная скорость постоянная. Взаимная сила притяжения между планетой и искусственным спутником сообщает спутнику центростремительное ускорение (<math>a</math>). Поэтому уравнение движения спутника записывается в виде:</p> $ma = G \frac{mM}{(R+h)^2} \rightarrow a = G \frac{M}{(R+h)^2}.$ <p>Так как центростремительное ускорение тела, движущегося равномерно по круговой орбите на высоте <math>h</math>, равно <math>a = \frac{v^2}{R+h}</math>, то получим систему уравнений:</p> $\begin{cases} a = G \frac{M}{(R+h)^2} \\ a = \frac{v^2}{R+h} \end{cases}$ <p>Формула первой космической скорости выводится решением этой системы уравнений относительно скорости <math>v</math>. Можете ли вы получить эту формулу?</p>

**Обсуждение результатов:**

- Чему равна первая космическая скорость, сообщаемая телу для превращения его в искусственный спутник планеты?
- Как зависит первая космическая скорость от массы искусственного спутника?
- Вычислите первую космическую скорость у поверхности Земли ( $h \ll R$ ) и на высоте  $h = 300$  м от поверхности Земли. Принять во внимание, что масса Земли  $M = 6 \cdot 10^{24}$  кг, а радиус  $R = 6400$  км.

## 2.8 Сила упругости



В III веке до нашей эры древние греки успешно использовали в сражениях, изготовленную Архимедом оборонную "технику".



На основе принципа работы архимедовой техники в 80-х годах XIX века парижский цирк "Франкони" впервые начал демонстрацию пушки стреляющей "живыми снарядами".

В аттракционе порох и газ не использовался, а возникающий дым и звук нужны были только для эффектной демонстрации.



- Что общего между принципом работы древнегреческой военной техники и пушки с "живыми снарядами" в XIX веке?
- За счет чего можно добиться более дальнего броска "снаряда" этим оружием?

### Исследование-1. Что определяется отношением силы к удлинению пружины?

**Оборудование:** динамометр, набор грузиков, линейка, штатив с зажимом и муфтой.

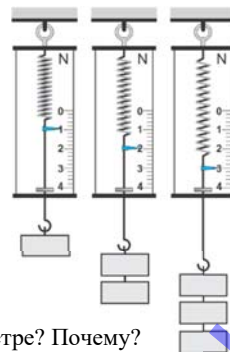
**Ход исследования:**

1. Закрепив динамометр в зажиме штатива, добейтесь, чтобы его стрелка стояла на нулевом делении.
2. Подвесьте на крючок динамометра груз массой  $m$ . По показаниям динамометра и линейки определите силу  $F_1$  и удлинение пружины  $x_1$  (а). Результаты занесите в соответствующие ячейки таблицы 2.4.
3. Повторите опыты последовательно добавляя к грузу на динамометре второй, третий и четвертый грузы одинаковой массы и, определяя силы  $F_2$ ,  $F_3$ ,  $F_4$  и соответствующие им удлинения пружины  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_4$ , занесите все в таблицу.
4. Вычислите на основании полученных значений отношения  $\frac{F_1}{x_1}$ ,  $\frac{F_2}{x_2}$ ,  $\frac{F_3}{x_3}$  и  $\frac{F_4}{x_4}$ .

Таблица 2.4

№	Сила, действующая на груз: $F$ (N)	Удлинение пружины: $x$ (m)	$\frac{F}{x}$
1	$F_1 =$	$x_1 =$	
2	$F_2 =$	$x_2 =$	
3	$F_3 =$	$x_3 =$	
4	$F_4 =$	$x_4 =$	

(а)



**Обсуждение результатов:**

- Какую физическую величину вы определили из отношения  $\frac{F}{x}$ ?
- Как изменяется это отношение с увеличением грузов на динамометре? Почему?

**Силы электромагнитной природы.** Известно, что наэлектризованные электрическим зарядом тела притягиваются или отталкиваются силами электрического характера. Если же электрические заряды в телах будут двигаться друг относительно друга, то дополнительно к электрическим силам между телами

возникают магнитные силы. Эти силы, прочно связанные между собой, невозможно отделить друг от друга, потому что они действуют одновременно. Поэтому говорят, что взаимодействие между наэлектризованными телами происходит в результате действия *сил электромагнитной природы*. Силы упругости и трения, являющиеся причиной изменения скорости механического движения тела, также являются *силами электромагнитной природы*.

**Сила упругости – это сила электромагнитной природы.**

Как вы знаете, любое твердое тело под действием внешней силы испытывает *деформацию* (см.: физика-7, стр.45).

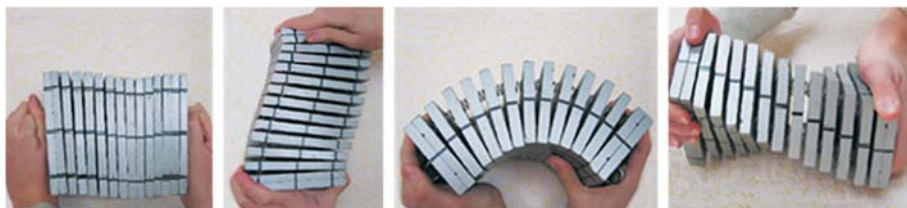
• **Деформацией** называется изменение формы и размеров тела под действием внешней силы. В результате деформации происходит смещение атомов и молекул относительно друг друга: расстояние между атомами или увеличивается, или уменьшается. Такое смещение вызывает соответствующее увеличение или уменьшение действия сил электростатического взаимодействия зарядов внутри атомов (положительных ядер и отрицательных электронов). В результате, в деформированной части тела возникает сила электромагнитной природы, “стараящаяся” вернуть тело в первоначальное состояние – *силой упругости*.

• **Сила упругости** – это сила, возникающая при деформациях твердого тела и действующая в направлении восстановления тела в первоначальном состоянии.

Если после прекращения действия на тело внешней силы оно под действием силы упругости полностью восстанавливает свою форму и размеры, то такая деформация называется *упругой деформацией*, если же это не происходит, *пластической деформацией*.

Различают следующие виды деформации: *растяжение-сжатие, изгиб, кручение и сдвиг*. При деформации *растяжение-сжатие* изменяется расстояние между частями тела, а при деформации *сдвига* части тела сдвигаются параллельно друг другу. Деформация *изгиба* состоит из комбинации деформации сжатия и растяжения частей твердого тела, а деформация *кручения* из комбинации деформации сдвига (**b**).

(b)



Деформация  
сжатия

Деформация  
сдвига

Деформация  
изгиба

Деформация  
кручения

**Закон Гука.** Деформация растяжение-сжатие твердого тела характеризуется величинами, называемыми *абсолютным удлинением* и *относительным удлинением*.

$$\Delta l = l - l_0, \quad (2.23)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (2.24)$$

Здесь  $l_0$  – начальная, а  $l$  – конечная длина твдого тела,  $\Delta l$  – его абсолютное удлинение, а  $\varepsilon$  – относительное удлинение (если  $\Delta l \ll l_0$ , то наблюдается упругая деформация). В СИ  $[\Delta l] = 1$  метр,  $[\varepsilon]$  – безразмерная величина.

Твердое тело, находящееся в деформированном состоянии, характеризуется механическим напряжением.

• **Механическое напряжение** – это физическая величина, равная отношению модуля силы упругости ( $F_{\text{упр}}$ ), возникшей во время деформации, к площади поперечного сечения тела ( $S$ ):

$$\sigma = \frac{F_{\text{упр}}}{S} \quad (2.25)$$

Единица измерения механического напряжения в СИ – паскаль (Па):

$$[\sigma] = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = 1 \text{ Па (паскаль)}.$$

• **Закон Гука:** При малых деформациях механическое напряжение прямо пропорционально относительному удлинению:

$$\sigma = E \cdot |\varepsilon|. \quad (2.26)$$

$E$  – коэффициент пропорциональности, называемый модулем Юнга.

• **Модуль Юнга** – это физическая величина, численно равная механическому напряжению, необходимому для увеличения длины тонкого стержня в два раза. Модуль Юнга зависит от материала, из которого изготовлено тело, единица его измерения в СИ – паскаль:  $[E] = \frac{[\sigma]}{[\varepsilon]} = 1 \text{ Па}$ .

Приняв во внимание уравнения (2.24) и (2.25) в законе Гука (2.26), получим:

$$\frac{F_{\text{упр}}}{S} = E \frac{|\Delta l|}{l_0} \rightarrow F_{\text{упр}} = \frac{ES}{l_0} |\Delta l| \quad (2.27)$$

Здесь

$$\frac{ES}{l_0} = k \quad (2.28)$$

называется коэффициентом упругости или жесткостью стержня.

Жесткость, являясь коэффициентом пропорциональности между силой упругости и абсолютным удлинением, зависит от материала, из которого изготовлено тело, и его геометрических размеров.

Приняв во внимание формулу (2.28) в формуле (2.27), закон Гука можно записать следующим образом:

$$F_{\text{упр}} = k |\Delta l| \quad (2.29)$$

Обычно закон Гука имеет вид:

$$F_{\text{упр}} = -kx \quad (2.30)$$

Где  $x = \Delta l$  выражает абсолютное удлинение, а знак минус показывает, что сила упругости направлена против направления смещения частиц тела (против удлинения).

Единица измерения жесткости в СИ:  $[k] = \frac{[F_{\text{упр}}]}{[\Delta l]} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ .



### Диаграмма растяжения

• **Диаграмма растяжения** – это график зависимости механического напряжения от относительного удлинения *твердого тела*. На диаграмме (с):

а) **участок 0–1** – это участок, на котором при малых деформациях механическое напряжение прямо пропорционально относительному удлинению, то есть выполняется закон Гука.

• Максимальное значение механического напряжения, при котором еще выполняется закон Гука, называется **пределом пропорциональности** ( $\sigma_{\text{проп}}$ ).

На участке графика выше цифры 1 закон Гука нарушается, наблюдается нелинейная деформация;

б) **участок 1–2** – соответствует участку, на котором упругая деформация сохраняется, то есть после прекращения внешнего воздействия образец возвращается к своим первоначальным размерам.

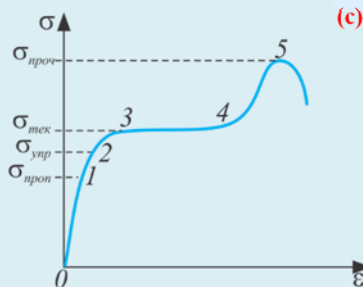
• Максимальное напряжение, при котором еще возникает упругая деформация, называется **пределом упругости** ( $\sigma_{\text{упр}}$ ). Механическое напряжение больше предела упругости вызывает пластическую деформацию;

с) **участок 2–3** – механическое напряжение, соответствующее пластической деформации;

д) **участок 3–4** – это участок “текучести” образца. Механическое напряжение ( $\sigma_{\text{тек}}$ ) имеет постоянное значение, относительное удлинение увеличивается;

е) **участок 4–5** – это участок с резким увеличением механического напряжения, соответствует разрушению тела.

• Максимальное механическое напряжение, приводящее к разрушению тела, называется **пределом прочности** ( $\sigma_{\text{проч}}$ ).



### Исследование-2. Применение. Проверка закона Гука

**Задача:** На рисунке дан график зависимости длины упругой пружины от силы, приложенной к ней (д). Определите жесткость пружины.

**Обсуждение результатов:**

- Как выражается закон Гука?
- С помощью какой формулы можно определить жесткость пружины?
- От чего зависит жесткость пружины?

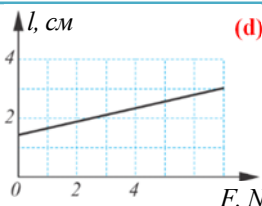
**Применение в повседневной жизни:**

Иногда утром по дороге в школу, вы можете увидеть некоторые последствия сильного ночного ветра: высокие и толстые сосны остались в вертикальном положении, однако на этой же территории некоторые относительно низкорослые чинары были сломаны.

• Есть ли какая-либо связь этого явления с силой упругости? Ответ обоснуйте.

**Провести самооценку:**

1. Какие понятия повторили на уроке? Что из этого вы хорошо поняли, а что осталось вам не ясным?
2. Почему сила упругости является силой электромагнитной природы?
3. От чего зависит сила упругости?
4. Что общего и чем отличаются между собой механическое напряжение и модуль Юнга?
5. Постройте график зависимости модуля силы упругости, возникающей в пружине жесткостью 200 Н/м, от абсолютного удлинения.

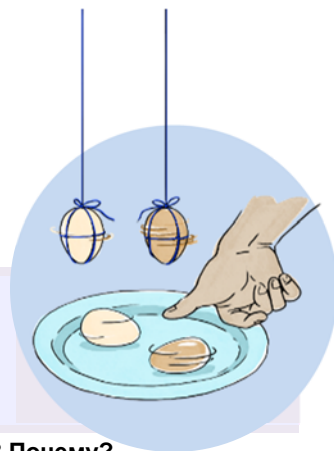


**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Запишите в рабочем листке определения нижеприведенных понятий: “деформация”, “сила упругости”, “механическое напряжение”, “Закон Гука”, “модуль Юнга”, “жесткость”.

## 2.9

## Сила трения. ДВИЖЕНИЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЫ ТРЕНИЯ

Проведите простой на первый взгляд эксперимент. Возьмите два яйца одинакового размера: одно сварено вкрутую, а другое сырое. Приведите их одновременно во вращательное движение (этот эксперимент можно провести с подвешенными на нити яйцами).



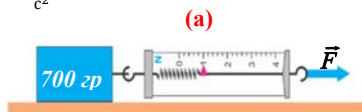
- Какое яйцо остановится быстрее: сырое или крутое? Почему?

### Исследование-1. Что вы помните о силе трения?

**Задача 1:** Определите коэффициент трения скольжения деревянного бруска по поверхности деревянной доски на основании представленной на рисунке информации (а), опираясь на знания о силе трения (см.: физика-7: стр. 50 и таблица 2); принять во внимание, что коэффициент трения скольжения для дерево-дерево  $\mu = 0,5$ ;  $g = 10 \frac{m}{c^2}$ .

#### Обсуждение результатов:

- От чего зависит коэффициент трения скольжения?
- Чему равен модуль силы трения?
- Что произошло бы, если бы отсутствовала сила трения?



**Сила трения.** Сила трения возникает между соприкасающимися друг с другом телами и направлена вдоль поверхности соприкосновения против их относительного движения. Причиной возникновения силы трения являются неровности соприкасающихся поверхностей и “силы сцепления” (силы притяжения) между молекулами этих поверхностей. Возникновение таких сил между молекулами определяет электромагнитную природу силы трения.

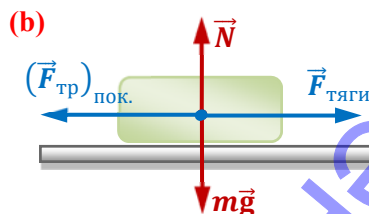
Существуют три вида силы трения:

- **Сила трения скольжения** – это сила трения, возникающая при скольжении одного тела по поверхности другого тела.
- **Сила трения качения** – это сила трения, возникающая, когда одно тело катится по поверхности другого.
- **Сила трения покоя** – это сила трения, возникающая между телами, находящимися в состоянии покоя друг относительно друга. Численно сила трения покоя равна силе тяги, направленной параллельно поверхности соприкосновения неподвижных тел, и направлена против нее (b).

При определенном значении силы тяги тело начинает двигаться и скользить по поверхности другого тела – возникает сила трения скольжения.

Численное значение силы трения скольжения прямо пропорционально силе реакции опоры (силе давления) и равно максимальному значению силы трения покоя:

$$(F_{\text{тр.}})_{\text{скольжения}} = (F_{\text{тр.}})_{\text{покоя}}^{\text{max}} = \mu N. \quad (2.31)$$



Где  $\mu$  – коэффициент пропорциональности, называемый *коэффициентом трения скольжения*. Коэффициент трения скольжения зависит от материалов, из которых изготовлены соприкасающиеся тела, и качества обработки соприкасающихся поверхностей.  $\mu$  – безразмерная величина, единица измерения отсутствует.

В зависимости от свойств соприкасающихся поверхностей силу трения называют *сухой силой трения* и *силой сопротивления*.

- **Сухое трение** – это трение, возникающее между поверхностями соприкасающихся твердых тел.
- **Сила сопротивления** – это сила, возникающая во время движения твердого тела в жидкости или газе.

**Движение под действием силы трения.** Исследуем разные движения тела массой  $m$  под действием силы трения:

1. Тело движется прямолинейно равномерно по горизонтальной поверхности. Все силы, действующие на тело, показаны на схеме (с). При равномерном движении тела его ускорение  $a = 0$ , следовательно, II закон Ньютона, или уравнение движения тела в векторном виде записывается так:

$$0 = \vec{F}_{\text{тяги}} + \vec{F}_{\text{тр}} + \vec{N} + m\vec{g}.$$

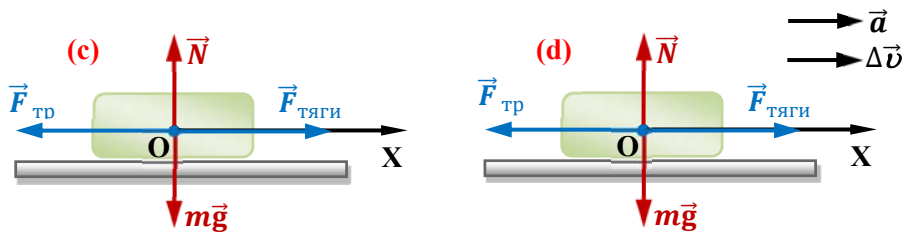
Выбрав координатную ось вдоль направления силы тяги (в направлении движения) и получив проекции всех сил на эту ось, можно написать уравнение движения (см: с):

$$0 = F_{\text{тяги}} - F_{\text{тр}} + 0 + 0.$$

Здесь было принято во внимание, что проекции силы реакции и силы тяжести на ось  $OX$  равны нулю – эти векторы перпендикулярны оси.

Таким образом, модули сил, действующих на тело, движущееся равномерно прямолинейно по горизонтальной поверхности, попарно равны и компенсируют взаимное действие друг друга:

$$N = mg; F_{\text{тяги}} = F_{\text{тр}} = \mu N = \mu mg. \quad (2.32)$$



2. Тело движется прямолинейно равнопеременно по горизонтальной поверхности (d). В этом случае уравнение движения тела в общем виде:

$$m\vec{a} = \vec{F}_{\text{тяги}} + \vec{F}_{\text{тр}} + \vec{N} + m\vec{g}. \quad (2.33)$$

Спроецировав силы на горизонтальную координатную ось, запишем уравнение движения в скалярном виде:

$$ma = F_{\text{тяги}} - F_{\text{тр}} = F_{\text{тяги}} - \mu mg. \quad (2.34)$$

Любая величина, входящая в последнее выражение, с легкостью определяется.

3. На движущееся тело действует только сила трения. Так как сила трения всегда направлена против направления движения, то ускорение, сообщаемое этой силой, направлено против скорости движения тела. Поэтому, если на движущееся тело действует только сила трения, то оно тормозится. В этом случае уравнение движения записывается в виде:

$$m\vec{a} = \vec{F}_{\text{тр}} + \vec{N} + m\vec{g} \quad (2.35)$$

$$ma = F_{\text{тр}} \quad (2.36).$$

Для ускорения тела имеем

$$a = \frac{F_{\text{тр}}}{m} = \frac{\mu mg}{m} = \mu g.$$

Отсюда можно определить тормозной путь и время торможения тела, движущегося по горизонтальной дороге:

$$l_{\text{тр}} = \frac{v_0^2}{2a} = \frac{mv_0^2}{2F_{\text{тр}}} = \frac{v_0^2}{2\mu g} \quad (2.37)$$

$$t_{\text{тр}} = \frac{v_0}{a} = \frac{mv_0}{F_{\text{тр}}} = \frac{v_0}{\mu g}. \quad (2.38)$$

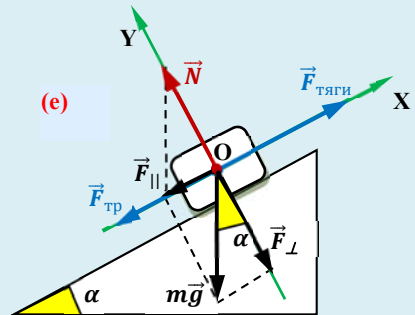
#### Тело движется по наклонной плоскости

• Наклонная плоскость – это плоскость, образующая определенный угол  $\alpha$  с горизонтом. Как показано на рисунке, сила тяжести, действующая на тело, движущееся равномерно под действием силы тяги по наклонной плоскости, раскладывается на две составляющие силы: составляющую, параллельную поверхности  $\vec{F}_{\parallel}$ , и составляющую, перпендикулярную поверхности  $\vec{F}_{\perp}$  (е). В этом случае модуль силы реакции опоры равен модулю составляющей  $\vec{F}_{\perp}$ :

$$N = F_{\perp} = mg \cos \alpha, \quad (2.39)$$

$$F_{\text{тр}} = \mu N = \mu mg \cos \alpha, \quad (2.40)$$

$$F_{\parallel} = mg \sin \alpha. \quad (2.41)$$



Уравнение движения тела по наклонной плоскости в общем виде записывается так:

$$m\vec{a} = \vec{F}_{\text{тяги}} + \vec{F}_{\text{тр}} + \vec{N} + m\vec{g}.$$

Для решения уравнения выбираем прямоугольную систему координат XOY, находим проекции сил на ее оси и получаем систему двух уравнений:

$$\begin{cases} ma_x = F_{\text{тяги}} - F_{\text{тр}} - F_{\parallel} \\ ma_y = N - F_{\perp}. \end{cases} \quad (2.42)$$

Ввиду отсутствия движения вдоль оси OY  $a_y = 0$ . Учитывая этот факт и уравнения (2.39) – (2.41), можно определить ускорение тела:

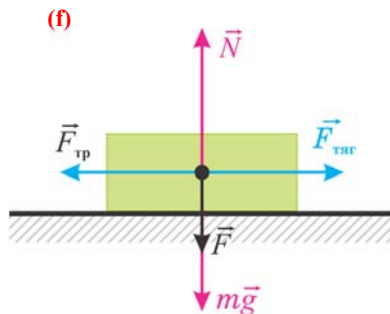
$$a_x = \frac{F_{\text{тяги}} - F_{\text{тр}} - F_{\parallel}}{m} = \frac{F_{\text{тяги}} - \mu mg \cos \alpha - mg \sin \alpha}{m}.$$

**Применение. Исследование-2**

Умее ли вы записать уравнение движения тела?

**Задача 2:** Запишите уравнения движения для нижеперечисленных состояний:

- на тело массой  $m$ , движущееся равномерно прямолинейно, действует сила  $\vec{F}$  в том же направлении, что и сила тяжести ( $\vec{f}$ );
- на тело массой  $m$ , движущееся равномерно прямолинейно, действует сила  $\vec{F}$  в противоположном направлении силе тяжести;
- тело массой  $m$  движется прямолинейно равнозамедленно.

**Обсуждение результатов:**

- Чему равны модули силы реакции опоры и силы тяги при действии силы  $\vec{F}$  в направлении силы тяжести во время прямолинейного равномерного движения?

**Применение в повседневной жизни:**

Внезапно перед автомобилем, движущемся по жилому поселку со скоростью 72 км/час, выскакивает бродячая собака на расстоянии 5 м. Водитель резко тормозит автомобиль. Ударит ли тормозящий автомобиль собаку?

Принять во внимание, что коэффициент трения между шинами автомобильных колес и сухим асфальтом дороги равен:  $\mu = 0,5$ ;  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .

**Провести самооценку:**

- Какие понятия повторили на уроке? Что из этого вы хорошо поняли, а что осталось вам не ясным?
- Два автомобиля массой, соответственно, 10 тонн и 1 тонна движутся по мокрому асфальту с одинаковой скоростью. У какого автомобиля, при одновременном их торможении, тормозной путь более длинный?
- Что произошло бы, если не было бы трения?
- Как зависит коэффициент трения скольжения от силы трения и массы тела? Ответ обоснуйте.
- От чего зависит сила трения скольжения?
- Чему будет равна сила сопротивления воздуха, действующая на тело, подвешенное на нити, при равнозамедленном перемещении вместе с подвесом против направления действия силы тяжести?

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Запишите в рабочем листке определения нижеприведенных понятий: “сила трения”, “сила трения покоя”, “сила трения скольжения”, “сила трения качения”, “тормозной путь”, “сила сопротивления”.

## 2.10 УСЛОВИЯ РАВНОВЕСИЯ ТЕЛА

Вспомните знаменитую басню русского писателя И. Крылова “Лебедь, рак и щука”.

Персонажи басни хотят привести в движение легкую телегу: “...*Лебедь рвется в облака, Рак пятится назад, а Щука тянет в воду...* Да только воз и ныне там”.



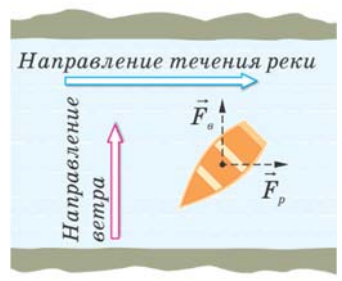
- Как можно объяснить на “языке” физики, почему персонажи не могут сдвинуть с места телегу?

### Исследование-1. Что означает нахождение тела в состоянии равновесия? (а)

**Задача 1:** Может ли находиться в состоянии равновесия лодка на воде, испытывая одновременное действия течения реки и дующего южного ветра (а)? Обоснуйте ответ по схеме.

#### Обсуждение результатов:

- Что означает состояние равновесия тела?



По I закону Ньютона, нахождение тела в состоянии равновесия означает, что оно находится в покое или движется прямолинейно и равномерно в инерциальной системе отсчета. Ознакомимся с условиями, при выполнении которых тело остается в состоянии равновесия.

**Равновесие тела при поступательном движении.** Поступательное движение тела можно рассматривать как движение одной его точки – движение центра массы. В этом случае для простоты можно принять, что вся масса тела сосредоточена в центре и равнодействующая сила, действующая на тело, прикладывается к этой точке. Из законов Ньютона знаем, что ускорение данной точки равно нулю тогда, когда равнодействующая сила (геометрическая сумма всех действующих сил), прикладываемая к этой точке, равна нулю. *Это условие равновесия тела при поступательном движении:*

- Для нахождения тела в состоянии равновесия при его поступательном движении равнодействующая сила (геометрическая сумма всех действующих на тело сил), прикладываемая к телу, должна быть равна нулю:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = \vec{F} = 0.$$

Если геометрическая сумма сил равна нулю, то и сумма проекций этих сил на произвольную координатную ось равна нулю:

$$F_{1x} + F_{2x} + \dots + F_{nx} = 0$$

$$F_{1y} + F_{2y} + \dots + F_{ny} = 0$$

$$F_{1z} + F_{2z} + \dots + F_{nz} = 0.$$

**Равновесие тела с неподвижной осью вращения.** На практике очень часто бывает, что при действии на тело с неподвижной осью вращения двух численно

равных, но противоположно направленных параллельных сил, оно начинает вращаться вокруг этой оси. Например, блок, ворот и другие вращаются за счет таких параллельных сил. Значит, чтобы тело с неподвижной осью вращения находилось в состоянии равновесия, не достаточно, чтобы равнодействующая сила была равна нулю. Необходимо выполнение второго условия равновесия – *правила моментов*.

• Тело с неподвижной осью вращения находится в равновесии, если алгебраическая сумма моментов действующих на него сил относительно оси вращения равна нулю:

$$M_1 + M_2 + \dots + M_n = 0$$

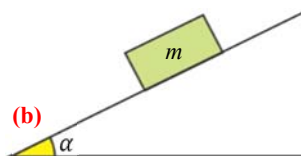
**Исследование-2. Применение.** Какое условие равновесия выполняется для тела на наклонной плоскости?

**Задача 2:** Определите для тела на наклонной плоскости (b):

- формулу, выражающую условие равновесия;
- силу, которая уравнивает силу трения;
- силу, которая уравнивает силу реакции опоры.

**Обсуждение результатов:**

- Какое условие должно выполняться, чтобы тело на наклонной плоскости находилось в состоянии равновесия?
- Сколько сил действует на тело, находящееся в состоянии равновесия на наклонной плоскости? Можете ли показать эти силы на схеме?



**Применение в повседневной жизни:**

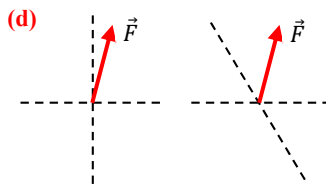
Вероятно, вы когда-либо с друзьями проводили эксперименты, подобные показанному на рисунке: камень, помещенный на рычаг, уравнивается птичьим пером (c).

- Какое условие равновесия выполняется в этом явлении? Можете ли обосновать ответ?
- Можно ли сказать, что масса птичьего пера и камня одинакова? Почему?



**Провести самооценку:**

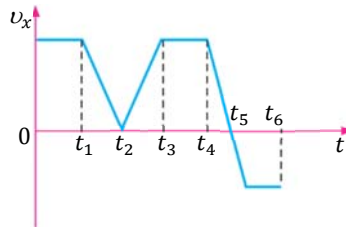
- Какие понятия повторили на уроке? Что из этого вы хорошо поняли, а что осталось вам не ясным?
- Материальная точка движется под действием двух сил, равных по модулю 60 Н и 80 Н. Угол между силами 90°. Определите:
  - направление ускорения материальной точки (представьте это на схеме);
  - модуль и направление силы, прикладываемой к материальной точке для сохранения ее в состоянии равновесия (представьте это на схеме)?
- Определите составляющие равнодействующей силы  $\vec{F}$ , представленной на рисунке, вдоль пунктирных линий (d).



**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Запишите в рабочем листке краткое эссе о нижеприведенных понятиях: “условие равновесия тела, движущегося поступательно”, “условие равновесия тела с неподвижной осью вращения”.

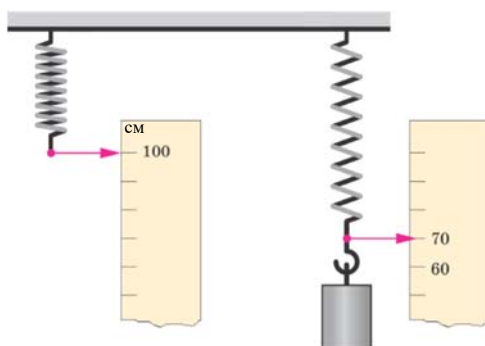


- 2.1. К телу прикладываются две силы, равные по модулю  $F_1 = 8\text{ Н}$  и  $F_2 = 6\text{ Н}$ . Определите максимальное и минимальное возможное значение равнодействующей силы.
- 2.2. Каков модуль равнодействующей силы, если угол между силами  $F_1$  и  $F_2$  из предыдущей задачи, равен:  $60^\circ$ ;  $90^\circ$ ?
- 2.3. Определите по графику зависимости проекции скорости от времени интервал времени, в котором равнодействующая сила равна нулю.



- 2.4. В каком направлении отклоняются пассажиры при резком движении автобуса с остановки и внезапном торможении при приближения к остановке? Противоречит ли это явление первому закону Ньютона, так как на пассажиров никакая дополнительная сила не действует?
- 2.5. Под действием силы  $F$  тело массой  $m_1$  движется с ускорением  $3\text{ м/с}^2$ , а тело массой  $m_2$  с ускорением  $5\text{ м/с}^2$ . С каким ускорением будут двигаться эти тела, соединенные вместе, под действием этой же силы?
- 2.6. Строительный кран поднимает вверх груз массой 20 тонн с ускорением  $0,8\text{ м/с}^2$ . Определите силу натяжения стального троса строительного крана ( $g = 10\text{ м/с}^2$ ; вес троса строительного крана не учитывать).
- 2.7. Скорость автомобиля массой 1,2 тонны за 5 секунд уменьшается на  $60\text{ м/с}$ . Чему равен модуль равнодействующей силы, действующей на автомобиль?
- 2.8. Тело массой  $m$  под действием равнодействующей силы  $F$  за промежуток времени  $t$  перемещается на расстояние  $s$ . На какое расстояние переместится тело массой  $2m$  за промежуток времени  $3t$  под действием этой же равнодействующей силы (в обоих случаях начальная скорость равна нулю)?
- 2.9. На полу лифта лежит тело массой 100 кг. Определите, с каким ускорением и в каком направлении движется лифт, если груз действует на пол лифта с силой  $1300\text{ Н}$  ( $g = 10\text{ м/с}^2$ ).
- 2.10. Скорость прямолинейно движущегося автомобиля, масса которого 1 тонна, за 9 секунд изменяется от  $20\text{ м/с}$  до  $38\text{ м/с}$ .  
Определите:  
а) ускорение автомобиля;  
б) модуль силы, действующей в направлении движения автомобиля;  
в) импульс силы, действующей на автомобиль;  
г) перемещение автомобиля за время изменения его скорости.
- 2.11. Как изменится сила притяжения между двумя материальными точками, если расстояние между ними уменьшится в 3 раза?
- 2.12. Чему равна напряженность гравитационного поля на высоте  $h = 3R_{\text{Земли}}$  от поверхности Земли (на поверхности Земли  $g = 9,81\text{ м/с}^2$ )?

- 2.13. При подвешивании на проволоке груза массой 10 кг она удлиняется на 0,5 мм. Определите жесткость проволоки ( $g = 10 \text{ м/с}^2$ ).
- 2.14. При растяжении пружины на 0,15 м в ней возникает сила упругости 0,006 кН. На сколько надо растянуть пружину для возникновения в ней силы упругости 16 Н?
- 2.15. Пружина, расположенная перед метровой линейкой, растянута грузом массой 2 кг. Определите:
- на каком делении остановится стрелка, закрепленная на пружине, при подвешивании к данному грузу второго, такого же;
  - жесткость пружины ( $g = 10 \text{ м/с}^2$ ).



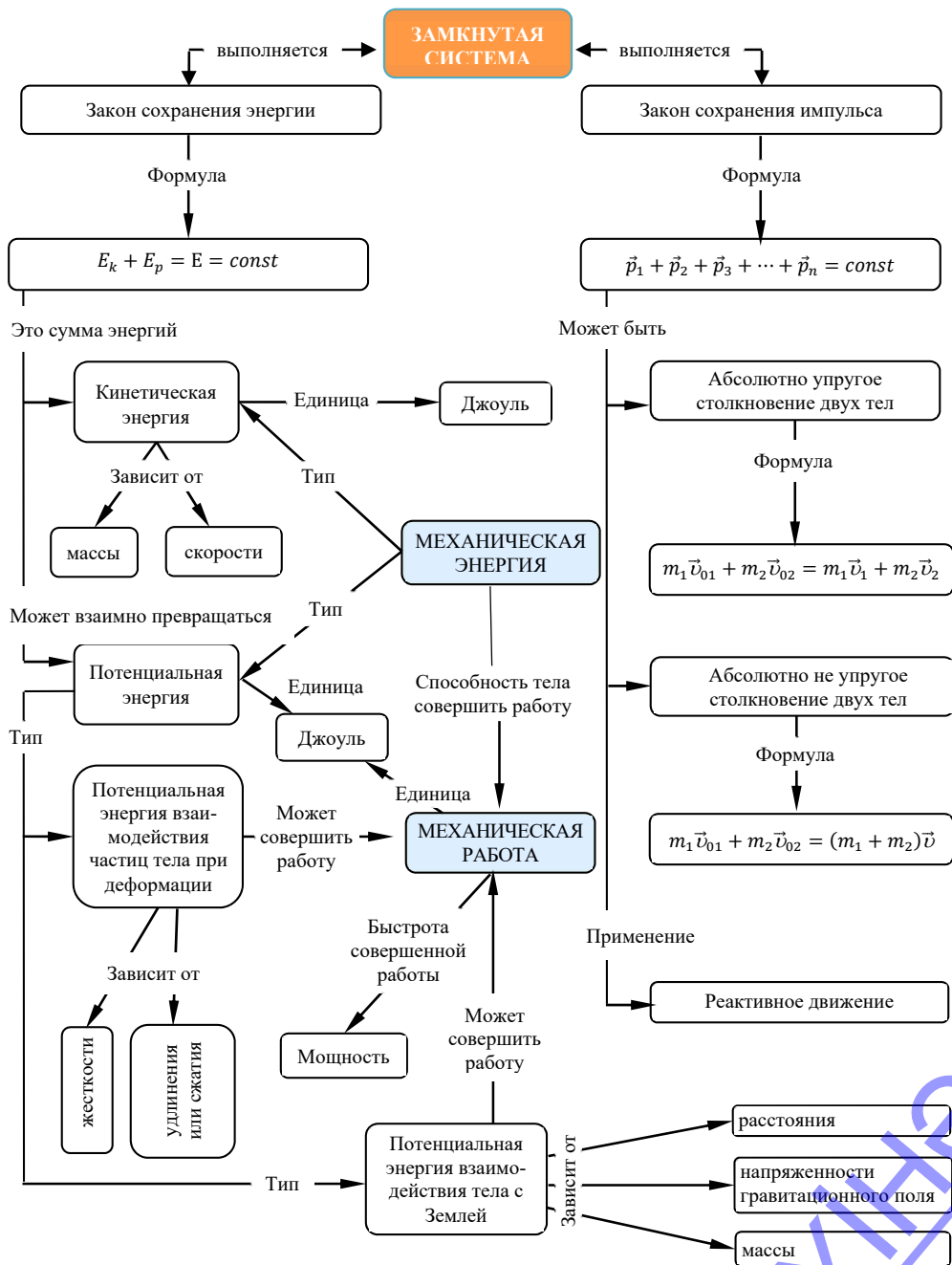
- 2.16. С какой силой необходимо толкать деревянную балку массой 18 кг для равномерного скольжения ее по деревянному полу (для дерева по дереву  $\mu = 0,5$ ;  $g = 10 \text{ м/с}^2$ )?
- 2.17. Автомобиль массой 2 тонны движется по шоссе со скоростью  $126 \frac{\text{км}}{\text{час}}$ . Водитель автомобиля видит отару овец, переходящих дорогу, на расстоянии 100 м от него и начинает тормозить. Столкнется ли автомобиль с отарой до момента полной остановки? (для резины на шинах автомобиля по мокрому асфальту  $\mu = 0,7$ ;  $g = 10 \text{ м/с}^2$ )?
- 2.18. Какова первая космическая скорость у поверхности Юпитера?  
( $G = 6,7 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Нм}^2}{\text{кг}^2}$ ; см: таблица 2.3)
- 2.19. Координата тела, движущегося прямолинейно под действием постоянной силы 50 Н, изменяется по закону  $x = 4 + 3t - t^2$ . Определите: а) ускорение движения тела; б) массу тела.
- 2.20. Балка весом 1600 Н подвешена на двух стальных тросах. Каковы силы натяжения стальных тросов, закрепленных в точках на расстоянии 3 м и 1 м от центра массы балки (вес стальных тросов не учитывается)?

# ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ

Освоив материалы этой главы –  
**ВЫ СУМЕЕТЕ:**

- комментировать понятие “замкнутая система”, обосновывать причину использования этих систем учеными;
- объяснить закон сохранения импульса и продемонстрировать его простыми опытами;
- составлять и решать задачи количественного и качественного характера с применением закона сохранения импульса;
- объяснить механизм возникновения кинетической и потенциальной энергии, обосновать опытами связь этих энергий с другими физическими величинами;
- объяснить закон сохранения энергии и продемонстрировать его простыми опытами;
- составлять и решать задачи количественного и качественного характера с применением закона сохранения энергии;
- объяснить энергию как величину характеризующую способность тела совершать работу и условия совершения механической работы;
- составлять и решать задачи количественного и качественного характера по определению механической работы и мощности.

ЛАЙН



### 3.1 ЗАМКНУТАЯ СИСТЕМА. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА



Барон Мюнхгаузен утверждал, что он как будто бы вытащил сам себя вместе с лошадей из болота, ухватившись за свои волосы.

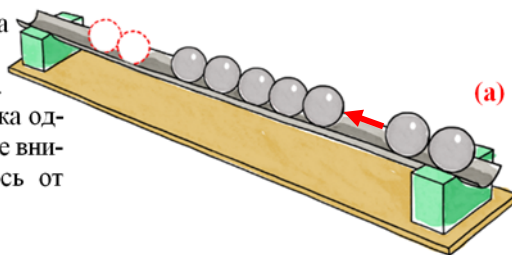
- Как, по-вашему, верно ли утверждение барона Мюнхгаузена и возможно ли это? Почему?
- Мог ли спастись барон Мюнхгаузен из болота таким способом?

#### Исследование-1. Удивительное столкновение шариков

**Оборудование:** желоб Галилея, стальные шарики одинаковых размеров (8–10 штук), деревянная опора (или штатив с муфтой и зажимом).

**Ход исследования:**

1. Закрепите желоб на горизонтальной опоре и выложите на нем последовательно ряд шариков, соприкасающихся друг с другом (а). Один из шариков отделите и толкните вдоль желоба. Проследите за явлением, произошедшим после столкновения его с цепочкой шариков.
2. Повторите опыт, толкнув два шарика одновременно вдоль желоба, и проследите за произошедшим явлением.
3. Повторите опыт, толкнув три шарика одновременно вдоль желоба, и обратите внимание, сколько шариков отделилось от цепочки шариков.



**Обсуждение результатов:**

- Что наблюдалось при ударе одного шарика по цепочке шариков?
- Сколько, соответственно, отделилось шариков от цепочки при повторении опытов с двумя и тремя шариками?
- Выскажите свое предположение о причине этих явлений.

**Что такое замкнутая система?** Как вы уже знаете, все изменения, происходящие в природе, есть результат взаимодействия между телами. Существуют разные виды взаимодействия – *гравитационное, электромагнитное, ядерное и слабое*. Характер этих взаимодействий зависит не только от их природы, но и от расстояния между взаимодействующими телами и свойств этих тел. В каждом явлении один из видов взаимодействия является более решающим по сравнению с другими. Например, если гравитационное взаимодействие на больших расстояниях является решающим, то на расстояниях, сравнимых с размерами атомного ядра, можно говорить только о действии ядерных сил. Исследуя определенные явления, ученые не учитывают второстепенные (не являющиеся решающими в данном явлении) взаимодействия. Например, при вычислении силы тяги вертолета необходимо учитывать силу притяжения Земли. В то же время действие притяжения Луны и электромагнитное взаимодействие между вертолетом и облаками не учитываются.

В общей научной картине природы группа объектов, связанных общими свойствами и условно изолированных от внешней среды, рассматривается как замкнутая система.

• **Замкнутая система** – это система тел, при данных условиях взаимодействующих только друг с другом и не взаимодействующих с другими телами (равнодействующая внешних сил равна нулю). В замкнутых системах выполняются законы сохранения.

**Закон сохранения импульса.** Импульс является одной из физических величин, обладающих свойством сохранения. Это свойство состоит в том, что при взаимодействии тел только друг с другом сумма их импульсов не меняется, полный импульс системы остается постоянным.

• **Полным импульсом системы** называется геометрическая сумма импульсов всех тел, из которых состоит система.

В результате взаимодействия тел их импульсы меняются. Как образец исследуем взаимодействие двух тел.

Обозначим импульс первого тела до взаимодействия  $\vec{p}_{01}$ , а после взаимодействия  $\vec{p}_1$ , соответственно, для импульса второго тела –  $\vec{p}_{02}$  и  $\vec{p}_2$ . Силы, действующие на эти тела, соответственно, обозначим  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$ . Согласно III закону Ньютона, действие равно противодействию:  $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$ . Если умножить обе стороны равенства на время действия силы ( $\Delta t$ ), то для замкнутой системы равенство не нарушится :

$$\vec{F}_1 \cdot \Delta t = -\vec{F}_2 \cdot \Delta t \quad (3.1)$$

Учитывая, что  $\vec{F}_1 \cdot \Delta t$  равно изменению импульса первого тела, а  $\vec{F}_2 \cdot \Delta t$  – изменению импульса второго тела (см: 2.3 тема), получаем:

$$\Delta \vec{p}_1 = -\Delta \vec{p}_2$$

или

$$\vec{p}_1 - \vec{p}_{01} = -(\vec{p}_2 - \vec{p}_{02}). \quad (3.2)$$

• *Изменения импульсов двух тел, произошедшие в результате их взаимодействия, равны по модулю и противоположны по направлению.*

После преобразований получается, что векторная (геометрическая) сумма импульсов двух тел, взаимодействующих между собой, остается неизменной:

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}_{01} + \vec{p}_{02} = const.$$

Обобщая последнее выражение для замкнутой системы, состоящей из  $n$  тел, получим закон сохранения импульса:

• *Векторная сумма импульсов тел, составляющих замкнутую систему, остается постоянной:*

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3 + \dots + \vec{p}_n = const \quad (3.4)$$

**Столкновение двух тел.** Результатом столкновения двух тел является деформация и изменение их импульсов вследствие действия возникающих сил упругости. Различают два идеализированных вида столкновения: *абсолютно упругое и абсолютно неупругое столкновение.*

**Абсолютно упругое столкновение.** При абсолютно упругом столкновении происходит упругая деформация – тело восстанавливает форму и размеры. Как пример упругой деформации можно привести столкновение бильярдных или стальных шаров. При таких столкновениях механическая энергия не превращается во внутреннюю энергию – полная механическая энергия системы не уменьшается: кинетическая энергия полностью или частично превращается в потенциальную энергию упругой деформации, а эта энергия в свою очередь заново превращается в кинетическую энергию шаров. Для абсолютно упругого столкновения выполняется закон сохранения импульса (3.3): *Геометрическая сумма импульсов двух тел до абсолютно упругого столкновения равна геометрической сумме их импульсов после столкновения:*

$$m_1 \vec{v}_{01} + m_2 \vec{v}_{02} = m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 \quad (3.5)$$

Где  $m_1$  и  $m_2$  – массы шаров, составляющих замкнутую систему;  $\vec{v}_{01}$  и  $\vec{v}_{02}$  – начальные скорости шаров до столкновения,  $\vec{v}_1$  и  $\vec{v}_2$  – конечные скорости шаров после столкновения.

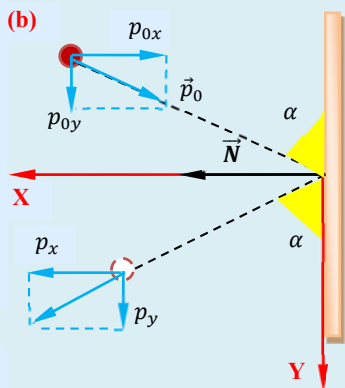
*Частный случай: абсолютно упругое столкновение шарика со стеной.* Предположим, что шарик сталкивается со стеной под углом  $\alpha$  (b). Сила реакции, возникающая во время удара, перпендикулярна плоскости стены. Так как проекция силы реакции  $\vec{N}$  на ось  $Y$  равна нулю, то в направлении этой оси на шарик эта сила не действует (действие силы тяжести не учитывается), следовательно, проекция импульса  $p_y$  сохраняется. Изменяется проекция  $p_x$ :

$$p_{0y} = p_y;$$

$$\Delta p_x = p_x - p_{0x} = p_x - (-p_x) = 2p_x = 2p_0 \sin \alpha.$$

Где  $\alpha$  – угол между направлением импульса (скорости)  $\vec{p}$  и плоскостью стены. Так как  $\Delta p_y = 0$ , то модуль изменения импульса этого столкновения будет равен:

$$\Delta p = \sqrt{(\Delta p_x)^2 + (\Delta p_y)^2} = \Delta p_x \text{ или } \Delta p = 2p_0 \sin \alpha.$$



**Абсолютно неупругое столкновение.** Возникающая при абсолютно неупругом столкновении деформация полностью сохраняется. В это время полная механическая энергия не сохраняется, некоторая её часть превращается во внутреннюю энергию системы. После абсолютно неупругого столкновения двух тел оба эти тела, “прилипнув” друг к другу, или движутся с общей скоростью, или покоятся.

Таким образом, закон сохранения импульса при абсолютно неупругом столкновении двух тел, образующих замкнутую систему, можно записать:

$$m_1 \vec{v}_{01} + m_2 \vec{v}_{02} = (m_1 + m_2) \vec{v}. \quad (3.6)$$

Где  $\vec{v}$  – приобретенная после абсолютно неупругого столкновения общая скорость двух тел, образующих замкнутую систему. Определим эту скорость из выражения (3.6):

$$\vec{v} = \frac{m_1 \vec{v}_{01} + m_2 \vec{v}_{02}}{(m_1 + m_2)}. \quad (3.7)$$

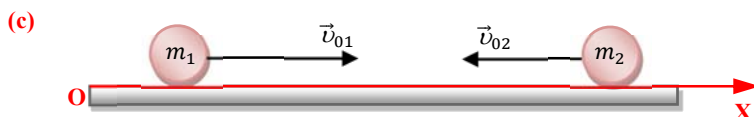


## Применение. Исследование-2

### Исследование абсолютно неупругого столкновения двух шариков

**Задача.** Докажите, что после абсолютно неупругого центрального столкновения двух шариков массами  $m_1$  и  $m_2$  ( $m_1 > m_2$ ), движущихся по горизонтальной плоскости со скоростями  $\vec{v}_{01}$  и  $\vec{v}_{02}$  ( $\vec{v}_{01} > \vec{v}_{02}$ ) соответственно, модуль скорости, приобретенной вторым шариком, равен нижеприведенному выражению (с):

$$v_2 = \frac{m_1 v_{01} - m_2 v_{02}}{m + m_2}.$$



### Обсуждение результатов:

- Какие последовательные шаги были осуществлены для получения нужной формулы?
- Чему равен модуль скорости второго шарика после абсолютно упругого центрального столкновения этих же шариков при их движении в одном направлении, например, в случае движения первого шарика за вторым?

### Применение в повседневной жизни:

Первый бильярдный шарик, находящийся в покое, подвергается абсолютно упругому центральному столкновению со вторым шариком. Как изменяются скорости первого и второго шариков после столкновения, согласно закону сохранения импульса?

### Провести самооценку:

1. Какие понятия повторили на уроке? Что из этого вы хорошо поняли, а что осталось вам не ясным?
2. Что такое замкнутая система и с какой целью ученые в своих научных исследованиях используют эту систему?
3. В каких случаях можно использовать закон сохранения импульса в замкнутых системах?
4. Какие превращения энергии происходят при абсолютно упругом и абсолютно неупругом столкновении двух тел, образующих замкнутую систему?
5. Ученик массой 50 кг со скоростью 8 м/с догоняет и запрыгивает на тележку массой 30 кг, движущуюся со скоростью 2 м/с. С какой скоростью будет двигаться тележка с учеником после этого?

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Запишите в рабочем листке определения нижеприведенных понятий: “замкнутая система”, “полный импульс системы”, “закон сохранения импульса”, “абсолютно упругое столкновение”, “абсолютно неупругое столкновение”.

### • ПРОЕКТ • Исследование реактивного движения

**Теоретическая информация.** Интересным практическим применением закона сохранения импульса является *реактивное движение*. Из курса физики 6-го и 8-го классов вы знаете, какое движение называется реактивным.

• **Реактивным движением** называется движение, которое возникает, когда от тела отделяется и движется в противоположную сторону от направления его движения, какая-либо его часть. Например, движение ракет основано на принципе реактивного движения.

**Принцип действия ракеты.** Ракета – замкнутая система, состоящая из оболочки и топлива. Оболочка представляет собой трубу, закрытую с одной стороны. На открытую сторону оболочки надевается сопло, при работе ракеты горящее топливо превращается в газ высокого давления, вследствие чего выбрасывается из сопла ракеты в атмосферу с большой скоростью, и в результате этого оболочка ракеты движется в противоположную сторону (**рис.1**).

Докажите, что скорость оболочки ракеты, по закону сохранения импульса, определяется следующей формулой:

$$v_{об} = - \frac{m_{газ}}{m_{об}} v_{газ}.$$

#### Старт “ракеты с водяным двигателем”

**Оборудование:** бутылка из пластика (объемом 1 литр), вода (0,5 литра), пробка, насос со шлангом и иглой для накачивания футбольного мяча, подставка.

#### Ход исследования.

1. Налейте в бутылку воды на 1/3 ее объема. Закройте горлышко бутылки пробкой. Поместите бутылку доншком вверх на подставку, под углом 40–50° к горизонту.
2. Проткнув иглой от насоса пробку, быстро накачивайте воздух в бутылку. Через несколько минут в бутылке произойдет “интересное” явление и “ракета” поднимется в воздух с большой скоростью (**рис.2**).

- Что стало причиной приобретения “ракетой” скорости? По какой формуле вычисляется эта скорость?



**рис.1.** Схема ракетносителя и трехступенчатого ракетносителя



**рис.2.** “Ракета” поднимется в воздух с большой скоростью

## 3.2

## МЕХАНИЧЕСКАЯ РАБОТА И МОЩНОСТЬ



Две команды учеников соревнуются в перетягивании каната. После больших усилий правая команда побеждает.

- Какое справедливое предположение можно выдвинуть о команде-победительнице: “команда справа более сильная” или “команда справа более мощная”? Почему?

**Механическая работа.** Механическая работа – физическая величина, характеризующая изменение состояния тела и зависящая от числового значения и направления равнодействующей силы и перемещения точки приложения этой силы.

- Механическая работа равна произведению модуля силы, действующей на тело, модуля его перемещения и косинуса угла между векторами силы и перемещения:

$$A = F \cdot s \cdot \cos \alpha. \quad (3.8)$$

Работа – скалярная физическая величина, которая, в отличие от других скалярных величин (например, путь, масса, площадь и другие), может быть равна нулю, принимать положительные или отрицательные числовые значение. Знак работы зависит от направления приложенной к телу силы и направления перемещения тела (а):

- а) если угол между векторами силы, действующей на тело, и его перемещением равен нулю или острый ( $0^\circ \leq \alpha < 90^\circ$ ), то  $\cos \alpha > 0$  и работа, совершенная силой, положительна:  $A > 0$ ;
- б) если угол между векторами силы, действующей на тело и его перемещением равен нулю или тупой ( $90^\circ < \alpha \leq 180^\circ$ ), то  $\cos \alpha < 0$  и работа, совершенная силой, отрицательна:

$$A < 0;$$

- в) если сила, действующая на тело, перпендикулярна перемещению ( $\alpha = 90^\circ$ ), то  $\cos \alpha = 0$  и данная сила работу не совершает:  $A = 0$ .

Единица измерения работы в СИ – джоуль (Дж):

- 1 джоуль (1 Дж) – это работа, которую совершает сила 1Н, перемещая тело на 1 м в направлении действия силы:

$$[A] = 1\text{Н} \cdot \text{м} = 1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2} = 1\text{Дж}.$$

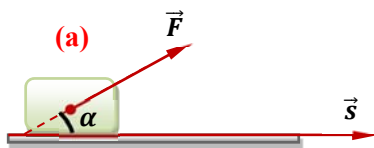
## Исследование-2.

## Одинаковая ли совершается работа?

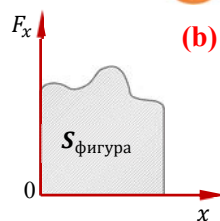
**Задача 1.** На воздушный путь 298 км от Баку до Гянджи самолет затрачивает 45 минут, вертолет же – 90 минут. Можно ли сказать, что эти транспортные средства совершают одинаковую работу? Как можно определить быстроту совершаемой ими работы?

## Обсудите результаты:

- От чего зависит совершенная работа?
- Какой физической величиной можно определить быстроту выполнения одной и той же работы, совершенной разными машинами?



**Частный случай.** Если тело движется вдоль оси  $X$ , то совершенная силой  $\vec{F}$  работа численно равна площади фигуры, находящейся между графиком зависимости проекции этой силы на ось  $X$  и осью абсцисс: (b):  $A = S_{\text{фигуры}}$ .



Работа постоянной по значению и направлению равнодействующей силы обладает двумя важными свойствами:

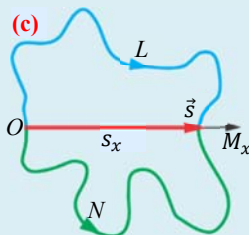
1. Работа, постоянной равнодействующей силы по произвольной замкнутой траектории равна нулю. Потому, что модуль перемещения тела по замкнутой траектории равен нулю:

$$s = 0 \rightarrow A = F s \cos \alpha = 0.$$

2. Работа, совершаемая постоянной равнодействующей силой во время движения тела между двумя данными точками, не зависит от формы траектории, соединяющей эти точки.

Например, так как перемещения тела, движущегося по траекториям OLM и ONM, соединяющим точки O и M, одинаковы, то и работы постоянной равнодействующей силы по этим траекториям одинаковы (c):

$$A_{OLM} = A_{ONM} = F_x \cdot s_x.$$



**Мощность.** Быстрота совершаемой работы характеризуется физической величиной, называемой *мощностью*.

- *Мощностью называется отношение совершенной работы ко времени, затраченному на выполнение этой работы:*

$$N = \frac{A}{t} \quad (3.9)$$

Единица измерения мощности в СИ — *ватт (Вт)*:

$$[N] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = 1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^3} = 1 \text{Вт}.$$

- 1 Ватт определяется как мощность, при которой за 1 с совершается работа в 1 Дж. Первую единицу измерения мощности предложил в 1789 году английский физик и изобретатель Джеймс Уатт — она называлась *лошадиной силой* (л.с.). Иногда и сегодня пользуются этой единицей:

$$1 \text{ л.с.} = 736 \text{ Вт}.$$

Работа, совершаемая постоянной силой за промежуток времени  $t$ :  $A = Nt$ . (3.10)

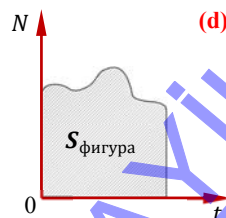
На основании этой формулы получена другая единица работы — *киловатт-час*:

$$1 \text{ кВт} \cdot \text{час} = 3\,600\,000 \text{ Дж}.$$

Если мощность с течением времени меняется, то числовое значения работы можно определить как площадь фигуры, лежащей под графиком мощность — время (d):  $A = S_{\text{фигуры}}$ .

При прямолинейном равномерном движении тела его мощность можно выразить через скорость движения тела. Например, мощность двигателя автомобиля, движущегося прямолинейно равномерно (при постоянном значении силы трения), равна:

$$N = \frac{A}{t} = \frac{F \cdot s}{t} = F \cdot v. \quad (3.11)$$



Из этого выражения получается, что при постоянной мощности двигателя автомобиля при малых значениях скорости имеем выигрыш в силе тяги (в случае I передачи скорости), а при малых значениях силы тяги имеем выигрыш в скорости (в случае IV и V передач скорости автомобиля):

$$F = \frac{N}{v}; \quad v = \frac{N}{F}.$$

### Исследование-2. Применение. Какую работу совершают мышцы атлета?

**Задача 2.** Атлет в течение 5 с поднимает штангу массой 250 кг на высоту 2 м. Определите:

- работу, совершаемую мышечной силой атлета ( $g = 10 \frac{м}{с^2}$ );
- мощность атлета в лошадиных силах при совершении этой работы.

#### Обсуждение результатов:

- Какой формулой определили работу, совершенную мышечной силой атлета и скольким джоулям она равна?
- С какой быстротой атлет совершил эту работу?
- Какова мощность атлета в л.с.?

#### Применение в повседневной жизни:

Мощность двигателей спортивного болида (спортивная машина “Формулы-1”) и трактора с плугом одинакова (е). В каком из них мощность затрачивается на выигрыш в силе, а в каком – на выигрыш в скорости? Ответ обоснуйте.



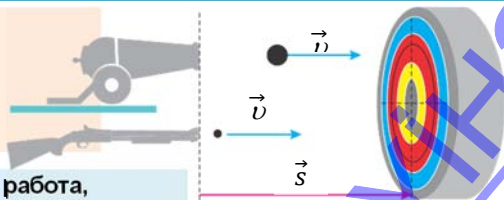
#### Провести самооценку:

- Какие понятия повторили на уроке? Что из этого вы хорошо поняли, а что осталось вам не ясным?
- В каком случае сила тяжести совершает положительную работу: мяч, брошенный вверх, или мяч, который падает с некоторой высоты? Ответ обоснуйте.
- Погрузим мяч, плавающий на поверхности воды, полностью в воду на некоторую глубину, а затем отпустим его. Мяч снова поднимается на поверхность воды. В каком из этих случаев работа, совершенная силой Архимеда, действующей на мяч, положительна, а в каком – отрицательна? Почему?
- Можно ли одновременно получить выигрыш и в силе, и в скорости при данной мощности? Почему?

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Запишите в рабочем листке определения нижеприведенных понятий: “механическая работа”, “джоуль”, “мощность”, “ватт”.

## 3.3 ЭНЕРГИЯ – СПОСОБНОСТЬ СИСТЕМЫ СОВЕРШИТЬ РАБОТУ. КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ

Пуля из винтовки и ядро из пушки, двигаясь с одинаковой горизонтальной скоростью, перемещаются на одинаковое расстояние и попадают в одну и ту же мишень.



- Можно ли сказать, что механическая работа, совершенная пулей и ядром, одинакова? Почему?

**Энергия** – это способность системы совершить работу. Вы уже узнали, что одной из физических величин, которые обладают свойством сохранения в замкнутой системе, является общий импульс системы. Другой очень важной физической величиной, обладающей свойством сохранения в замкнутой системе, является *энергия*. Понятие “энергия” часто используется в повседневной жизни (например, энергия является самой обсуждаемой темой на переговорах по международным экономическим вопросам). Вы имеете достаточно информации о различных видах энергии и о ее превращении из одного вида в другой. Самое важное то, что для каждого вида энергии учеными-физиками была определена своя формула. Проведенные с помощью этих формул вычисления каждый раз подтверждают постоянство суммы всех видов энергии замкнутой системы.

Как вы знаете, *энергия характеризует способность тела совершать работу* (см: физика-7, стр. 62). С другой стороны, *энергия – общая мера движения и взаимодействия тел. Движение тела характеризуется его кинетической энергией, а взаимодействие тел характеризуется потенциальной энергией.*

**Работа, совершаемая равнодействующей силой, и кинетическая энергия тела при поступательном движении.** Если тело под действием равнодействующей силы совершает работу, то модуль его скорости изменяется от  $v_1$  до  $v_2$ , то есть тело получает ускорение. Для простоты предположим, что тело под действием параллельной горизонту постоянной равнодействующей силы  $\vec{F}$  совершает положительную работу. В этом случае тело, двигаясь равноускоренно с ускорением  $a = \frac{F}{m}$ , совершает работу:  $A = F \cdot s = ma \cdot \frac{v_2^2 - v_1^2}{2a}$

$$\text{или} \quad A = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}. \quad (3.12)$$

В последней формуле половина произведения массы на квадрат скорости  $\left(\frac{mv^2}{2}\right)$  выражает физическую величину, называемую *кинетической энергией*.

- *Кинетическая энергия – это энергия, возникающая в результате движения тела:*

$$E_k = \frac{mv^2}{2}. \quad (3.13)$$

Кинетическая энергия зависит от массы тела и модуля его скорости (а не от его направления). Если запишем формулу (3.12) с учетом (3.13), то получим выражение, которое называется *теоремой о кинетической энергии*:

- *Работа, совершаемая над телом постоянной равнодействующей силой, равна изменению кинетической энергии тела:*

$$A = E_{k2} - E_{k1} = \Delta E_k. \quad (3.14)$$

Где  $E_{k1}$  и  $E_{k2}$  – начальное и конечное значения кинетической энергии тела. Кинетическая энергия – скалярная физическая величина и, в отличие от работы, может иметь только положительные значения или равняться нулю (превращается в другой вид энергии). Из выражения (3.14) видно, что:

#### Исследование-1. Применение.

**За счет изменения, какой физической величины была совершена работа?**

**Задача 1.** Автобус при выключенном двигателе некоторое время движется по горизонтальной дороге и затем останавливается.

**Обсуждение результатов:**

- Против каких сил автобус совершил работу?
- За счет изменения какой физической величины автобус совершил работу?



а) если работа, совершенная постоянной равнодействующей силой, положительна ( $A > 0$ ), то изменение кинетической энергии тела больше нуля:  $E_{k2} - E_{k1} > 0$  – кинетическая энергия увеличивается;

б) если работа, совершенная постоянной равнодействующей силой, отрицательна ( $A < 0$ ), то изменение кинетической энергии тела меньше нуля:  $E_{k2} - E_{k1} < 0$  – кинетическая энергия уменьшается;

с) если работа, совершенная постоянной равнодействующей силой, равна нулю ( $A = 0$ ), то и изменение кинетической энергии равно нулю:  $E_{k2} - E_{k1} = 0$  – кинетическая энергия не изменяется, то есть остается постоянной  $E_{k2} = E_{k1} = \text{const}$ .

Из теоремы о кинетической энергии видно, что единицей измерения кинетической энергии, как и работы, в СИ является джоуль (1Дж):  $[E_k] = 1\text{Дж}$ .

#### Примечание:

1. При доказательстве теоремы о кинетической энергии не было отмечено, какова природа силы, совершающей работу. Это значит, что теорема о кинетической энергии справедлива для любых сил (сила тяжести, сила трения, сила упругости или их равнодействующая сила), действующих на тело.
2. Кинетическая энергия, так же как и скорость движения, зависит от выбора системы отсчета. Например, если скорость пассажира в движущемся вагоне относительно системы отсчета, связанной с вагоном, равна нулю, то и кинетическая энергия пассажира относительно этой системы отсчета равна нулю. Однако кинетическая энергия пассажира относительно системы отсчета, связанной с Землей, отлична от нуля.

Так как скорость связана с импульсом, то и кинетическая энергия связана с импульсом:

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{pv}{2} = \frac{p^2}{2m}. \quad (3.15)$$

Если масса тела известна, то его скорость и импульс можно выразить через кинетическую энергию:

$$v = \sqrt{\frac{2E_k}{m}}, \quad (3.16)$$

$$p = \sqrt{2mE_k}. \quad (3.17)$$

#### Исследование-2. Применение

**Задача 2.** Ракета массой  $m$  летит со скоростью  $v$ . В результате горения топлива масса ракеты уменьшается в два раза, при этом ее скорость увеличивается в два раза. Как в это время изменится кинетическая энергия ракеты?

**Задача 3.** Какую работу необходимо совершить чтобы остановить поезд массой 1000 тонн, движущийся со скоростью 108 км/час?

#### Обсуждение результатов:

- Чему равно изменение кинетической энергии ракеты? Как определили это изменение?
- На основании какой формулы вы определили работу, которую необходимо совершить для остановки поезда? Почему?

#### Применение в повседневной жизни:

Два ученика во время зимних каникул вылетели на самолете из Баку в Стамбул. Самолет летит на высоте 8000 м от поверхности Земли. В это время один из учеников говорит другому: “Самолет летит, а мы находимся в покое, это значит, что у самолета есть кинетическая энергия, а наша кинетическая энергия равна нулю”. Второй ученик сразу ему возразил: “Нет, это неверно, мы так же обладаем кинетической энергией”.

- Какой из учеников говорит верно? Обладает ли кинетической энергией пассажир, находящийся внутри летящего самолета? Ответ обоснуйте.

#### Провести самооценку:

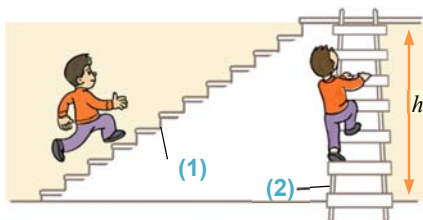
1. Какие понятия повторили на уроке? Что из этого вы хорошо поняли, а что осталось вам не ясным?



2. Какой вывод получаем из теоремы о кинетической энергии?
3. От чего зависит кинетическая энергия?
4. В каком случае кинетическая энергия равна нулю?
5. Зависит ли кинетическая энергия от выбора системы отсчета? Ответ обоснуйте.

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Запишите в рабочем листке определения нижеприведенных понятий: “энергия”, “кинетическая энергия”, “теорема о кинетической энергии”, “Кинетическая энергия может увеличиваться, уменьшаться или быть равной нулю...”, “ватт”.

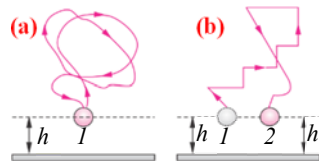
### 3.4 ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ



- При каком способе подъема мальчика на высоту  $h$  сила тяжести совершит наименьшую работу: по ступенькам наклонной лестницы (1) или по вертикальной лестнице (2)? Почему?

#### Исследование-1. Чему равна работа силы тяжести?

**Задача 1.** Тело начинает движение из точки 1 на высоте  $h$  от горизонтальной поверхности и, совершив движение вдоль сложной траектории, снова возвращается в точку 1, (а). Другое такое же тело, начав движение в точке 1 завершает его в точке 2 (б). Чем отличаются работы сил тяжести в этих случаях?



#### Обсуждение результатов:

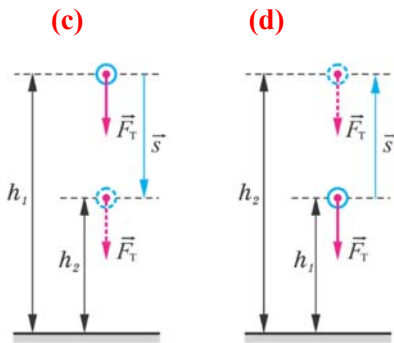
- От чего зависит сила тяжести?
- Может ли работа силы тяжести равняться нулю? Почему?

**Работа силы тяжести и потенциальная энергия.** Предположим, что замкнутая система состоит из Земли и тела, поднятого на определенную высоту  $h_1$  над ее поверхностью. Если тело свободно выпустить с этой высоты, то оно начинает движение под действием силы тяжести в направлении поверхности Земли. Сила тяжести, перемещая тело на  $\vec{s}$  до определенной высоты  $h_2$  от поверхности Земли, совершает положительную работу (при совпадении направлений силы тяжести и перемещения  $\alpha = 0$ ) (с):

$$A = F_T \cdot s = mg(h_1 - h_2). \quad (3.18)$$

Где  $s = h_1 - h_2$  модуль перемещения свободно падающего тела с высоты  $h_1$  на высоту  $h_2$ .

Если тело брошено вертикально вверх с высоты  $h_1$ , то в момент достижения его высоты  $h_2$  модуль перемещения будет равен  $s = h_2 - h_1$  (д). Так как в этом случае



угол между направлением силы тяжести и вектором перемещения равен  $\alpha = 180^\circ$ , а  $\cos \alpha = \cos 180^\circ = -1$ , то сила тяжести совершит отрицательную работу :

$$A = -F_T \cdot s = -mg(h_2 - h_1) = mg(h_1 - h_2). \quad (3.19)$$

Выражение (3.19) схоже с выражением (3.18), то есть тело, брошенное вертикально вверх, и свободно падающее тело совершают под действием силы тяжести одинаковую работу.

- Работа силы тяжести не зависит от формы траектории движения тела, она зависит от начального и конечного положения центра тяжести тела.
- Силы, под действием которых совершается работа, не зависящая от траектории движения тела, называются **консервативными силами**. Это значит, что сила тяжести является консервативной силой.

Формулу (3.18) можно записать и так:

$$A = mg(h_1 - h_2) = mgh_1 - mgh_2$$

$$\text{или } A = -(mgh_2 - mgh_1). \quad (3.20)$$

Это означает, что работа, совершаемая силой тяжести, равна изменению величины  $mgh$ , взятой с противоположным знаком. Эта величина является энергией взаимодействия тела, находящегося на высоте  $h$  над поверхностью Земли, с самой Землей.

- Энергия, которой обладают взаимодействующие тела (или частицы), называется *потенциальной энергией*:

$$E_p = mgh. \quad (3.21)$$

Приняв во внимание выражение (3.21) в выражении (3.20), получаем выражение, которое называется *теоремой о потенциальной энергии*:

- Работа, совершаемая силой тяжести, равна изменению потенциальной энергии, взятому с противоположным знаком:

$$A = -(E_{p2} - E_{p1}) = -\Delta E_p. \quad (3.22)$$

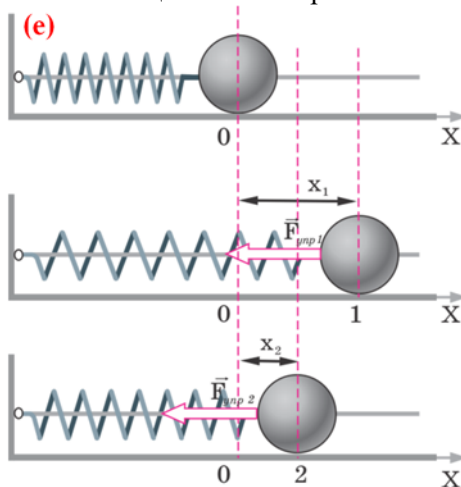
Из теоремы о потенциальной энергии видно, что единицей измерения потенциальной энергии, так же, как и работы, в СИ является джоуль (1Дж):  $[E_p] = 1\text{Дж}$ .

Потенциальная энергия тела, на которое действует сила тяжести, зависит от выбора нулевого уровня. За нулевой уровень можно принять уровень моря, поверхность стола, пол комнаты и другие. Потенциальная энергия тела, находящегося на какой-либо высоте относительно этих уровней, будет иметь разные значения. Однако разность потенциальных энергий двух, соответственно, разных положений тела не зависит от выбора нулевого положения, и она измеряется работой, совершенной силой тяжести. Из этого получаем *физический смысл потенциальной энергии*: Потенциальная энергия тела на высоте  $h$  равна работе, совершаемой силой тяжести в случае падения данного тела с этой высоты на нулевой уровень.

В зависимости от выбора нулевого уровня потенциальная энергия может быть, как положительной, так и отрицательной. Так, потенциальная энергия тела, помещенного на определенной высоте  $h$  от нулевого уровня, положительна, а потенциальная энергия тела, помещенного на определенной глубине  $h$  от нулевого уровня, отрицательна.

**Работа силы упругости и потенциальная энергия.** Еще одной консервативной силой является сила упругости. Поэтому работа, совершенная силой упругости, также должна быть равна изменению потенциальной энергии тела.

Исследуем это: прикрепим один конец пружины к опоре, другой же конец прикрепим к телу (шарику), способному двигаться по гладкому стержню. Сдвинув шарик вправо, растянем пружину на  $x_1$ . Модуль силы упругости, возникшей в пружине, равен  $F_{\text{упр}1} = -kx_1$ . Под действием этой силы свободно отпущенный шарик движется влево, например, из положения 1 в положение 2 (е). Так как в этом положении деформация пружины равна  $x_2$ , то модуль перемещения шарика равен разности растяжений пружины:  $s = x_1 - x_2$ . Так как направление перемещения совпадает с направлением



действия силы упругости, то работа, совершенная этой силой, положительна, однако должно быть принято во внимание, что модуль силы упругости не постоянен: он изменяется от значения  $kx_1$  до значения  $kx_2$ . На этом участке среднее значение модуля силы упругости равно среднеарифметическому значению его начального  $kx_1$  и конечного  $kx_2$  значений:

$$F_{\text{упр.сред}} = \frac{kx_1 + kx_2}{2}.$$

Таким образом, упруго деформированная пружина совершает положительную работу:

$$A = F_{\text{упр.сред}} \cdot s_x = F_{\text{упр.сред}} \cdot (x_1 - x_2) = \frac{kx_1 + kx_2}{2} \cdot (x_1 - x_2)$$

$$\text{или } A = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2}.$$

Эту формулу можно записать и так:

$$A = -\left(\frac{kx_2^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2}\right). \quad (3.23)$$

Как видно, работа, совершенная силой упругости, зависит от начальной и конечной деформации пружины.

Из сравнения формул (3.20) и (3.23) видно, что работа силы упругости также равна изменению некоторой величины, в этом случае  $\frac{kx^2}{2}$ , которая тоже является энергией взаимодействия:

• *Потенциальная энергия упругодеформированного тела равна половине произведения ее жесткости на квадрат растяжения (или сжатия):*

$$E_p = \frac{kx^2}{2}. \quad (3.24)$$

### Применение. Исследование-2.

**Задача 2.** Докажите, что работа, совершенная силой тяжести, при перемещении тела под ее действием из точки 1 в точку 2 не зависит от формы траектории движения (**a** и **b**) (**f**).

**Примечание.** Разделите траекторию на многочисленные малые прямолинейные участки и суммируйте работы совершенные на этих участках.

**Задача 3.** Пружина жесткостью  $300 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$  под действием внешней силы сжалась на 2 см. Какую дополнительную работу должна совершить внешняя сила, чтобы сжать пружину еще на 2 см?

**Примечание.** Для сжатия пружины из положения  $x_1$  в положение  $x_2$  внешние силы совершают работу:  $A = \frac{k}{2}(x_2^2 - x_1^2)$ .

#### Обсуждение результатов:

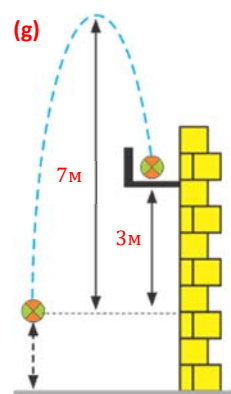
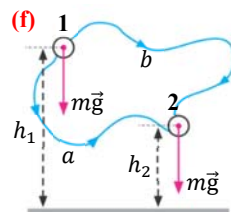
- Почему работа, совершенная силой тяжести, не зависит от формы траектории движения тела?
- Если тело, начав движение из точки 1 по некоторой траектории **ab**, снова окажется в точке 1, то:
  - а) чему будет равна работа силы тяжести, действующей на него?
  - б) чему равно изменение потенциальной энергии тела?
  - в) как изменяется потенциальная энергия тела?

**Применение в повседневной жизни:** Ученик хочет забросить мяч массой 100 гр, на балкон, находящийся на высоте 3 м от точки броска. Однако он не смог правильно рассчитать силу броска: мяч поднялся на высоту 7 м и только затем упал на балкон (**g**).

- Чему равна работа, совершенная силой тяжести вдоль всей траектории ( $g=10\text{м/с}^2$ )?

#### Провести самооценку:

1. Какие понятия повторили на уроке? Что из этого вы хорошо поняли, а что осталось вам не ясным?
2. Чему равна работа, совершенная силой тяжести?
3. Почему сила тяжести считается консервативной силой?
4. В каком случае говорят, что тело обладает потенциальной энергией?
5. Что означает нулевой уровень потенциальной энергии?
6. От чего зависит потенциальная энергия упруго деформированного тела?



**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Запишите в рабочем листке определения нижеприведенных понятий: “работа силы тяжести”, “потенциальная энергия”, “теорема о потенциальной энергии”, “потенциальная энергия приобретает отрицательное значение ...”, “потенциальная энергия приобретает положительное значение...” “консервативная сила”, “потенциальная энергия упруго деформированного тела”.

### 3.5 Полная механическая энергия. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ



Первый искусственный космический спутник Азербайджана “Azerspace/Africasat-1a”, вращаясь вокруг Земли с определенной скоростью, осуществляет обмен информацией между, можно сказать, радиостанциями всех континентов (а).

- Какой механической энергией обладает этот спутник: кинетической или потенциальной? Почему?

#### Исследование-1. Как изменяется полная механическая энергия?

**Задача 1.** Свободно отпущенный из точки 1 шарик массой  $m$  движется без трения по траектории, представленной на рисунке (б). В каких точках траектории полная механическая энергия шарика:

- а) наибольшая? б) наименьшая? с) одинаковая?

**Примечание.** Можете воспользоваться знаниями о законе сохранения энергии (см.: физика-7, стр.71–72).

#### Обсуждение результатов:

- Чему равна полная механическая энергия шарика в точке траектории 1?
- Чему равна полная механическая энергия шарика в точках траектории 2, 4 и 6?
- Чему равна полная механическая энергия шарика в точках траектории 3 и 5?
- К какому выводу о полной механической энергии шарика приводит исследование?

**Полная механическая энергия.** Система тел одновременно может обладать как кинетической, так и потенциальной энергией. Например, самолет, летящий на некоторой высоте с определенной скоростью, обладает наряду с кинетической энергией, также и потенциальной энергией вследствие взаимодействия с Землей.

• Сумму кинетической и потенциальной энергий системы тел называют **полной механической энергией**:

$$E = E_k + E_p.$$

**Закон сохранения полной механической энергии.** Вы уже знаете, что работа силы тяжести и упругости, являющихся консервативными силами, равна изменению потенциальной энергии системы, взятому с противоположным знаком. С другой стороны, эта работа также равна изменению кинетической энергии системы:

$$\begin{cases} A = -(E_{p2} - E_{p1}) \\ A = E_{k2} - E_{k1}. \end{cases}$$

Таким образом, получается, что:

$$E_{k2} - E_{k1} = E_{p1} - E_{p2}.$$

Сгруппировав соответствующие величины, это выражение можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} E_{k2} + E_{p2} &= E_{k1} + E_{p1}, \\ E &= \text{const.} \end{aligned} \quad (3.25)$$

Полученное равенство является выражением закона сохранения полной механической энергии.

• *Полная механическая энергия замкнутой системы тел, взаимодействующих друг с другом консервативными силами, остается неизменной.*

Закон сохранения полной механической энергии является результатом однородности времени.

• **Однородность времени** – это симметрия относительно переноса во времени: физические свойства замкнутой системы не зависят от выбора начального момента времени, то есть все моменты времени эквивалентны (равноправны).

Согласно закону сохранения полной механической энергии, увеличение потенциальной энергии системы сопровождается соответствующим уменьшением ее кинетической энергии, и наоборот. Превращение потенциальной энергии в кинетическую или кинетической в потенциальную, т.е. сохранение полной механической энергии является одним из самых важных законов в природе.

#### Частные случаи.

1. Полная механическая энергия для тела, движущегося под действием силы тяжести:

$$E = mgh + \frac{mv^2}{2} = \text{const.}$$

Где  $h$  – высота над нулевым уровнем, на котором находится тело в данный момент времени,  $v$  – скорость его движения. Значение полной механической энергии, оставаясь постоянным, зависит от данных условий. Например:

а) если тело было брошено с нулевого уровня  $h = 0$  вверх с начальной скоростью  $v_0$ , то его полная механическая энергия будет равна:

$$E = \frac{mv_0^2}{2}.$$

В этом случае, закон сохранения полной механической энергии в произвольной точке траектории движения записывается так (с):

$$\frac{mv_0^2}{2} = mgh + \frac{mv^2}{2};$$

б) если тело, брошенное вертикально вверх, поднимется на максимальную высоту  $H$ , то его полная механическая энергия будет:

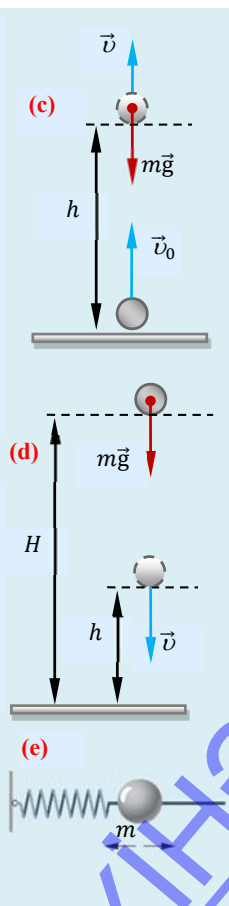
$$E = mgH.$$

В этом случае закон сохранения полной механической энергии тела, брошенного вертикально вверх, в произвольной точке траектории движения записывается так (d):

$$mgH = mgh + \frac{mv^2}{2}.$$

2. Если оттянуть и отпустить шарик массой  $m$ , закрепленный к одному из концов невесомой пружины жесткостью  $k$  и способный двигаться вдоль гладкого стержня (другой конец пружины закреплен к неподвижной опоре), то выражение полной механической энергии колебательного движения системы “шарик-пружина” будет следующим (e):

$$E = \frac{kx^2}{2} + \frac{mv^2}{2} = \text{const.}$$



**Закон сохранения полной энергии.** Известно, что полная механическая энергия свободно падающего тела во всех точках траектории одинакова.

- Что происходит при падении тела и его остановке на поверхности Земли?
- Можно ли в этом случае сказать, что “как кинетическая, так и потенциальная энергия тела равны нулю, то есть механическая энергия исчезает и нарушается закон сохранения энергии”?

Механическая энергия тел, составляющих замкнутую систему, не исчезает! Механическая энергия превращается в другой вид энергии – внутреннюю энергию системы: в результате соударения тела с поверхностью Земли система нагревается и ее внутренняя энергия увеличивается.

Можно привести примеры превращения энергии также и в других замкнутых системах. Например, в системе автомобиль-шоссе при торможении движущегося автомобиля его кинетическая энергия в результате трения превращается во внутреннюю энергию нагретых покрышек.

Таким образом, говоря о законе сохранения полной энергии, подразумевается сохранение всех видов энергии (механической, внутренней, электромагнитной и другие), превращающихся друг в друга, в замкнутой системе:

- Энергия не исчезает и не возникает из ничего, она превращается из одного вида в другой.

#### Исследование-2. Применение

**Задача 2.** Тело бросили вертикально вверх с начальной скоростью 10 м/сек. Какова скорость этого тела на высоте 3,2 м (сопротивление воздуха не учитывать;  $g = 10 \text{ м/с}^2$ )?

#### Обсуждение результатов:

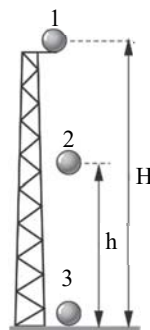
- Какой энергией обладает тело, брошенное вертикально вверх, на высоте  $h$ ?
- Какой формулой выражается закон сохранения механической энергии для этого тела?
- Как определить скорость тела на высоте 3,2 м?

**Применение в повседневной жизни:** На рисунке представлены три разные точки траектории движения тела, падающего с определенной высоты.

- Чему равна полная механическая энергия тела в каждой из этих точек (сопротивление воздуха не учитывать)?

#### Провести самооценку:

1. Какие понятия повторили на уроке? Что из этого вы хорошо поняли, а что осталось вам не ясным?
2. При каких условиях полная механическая энергия сохраняется?
3. При каких условиях полная энергия сохраняется?
4. В какой вид энергии может превратиться частично полная механическая энергия в результате трения тела?
5. Какие превращения энергии происходят в следующих явлениях:
  - а) падение массы воды в водопаде;
  - б) шарик, скатывающийся по наклонному желобу Галилея.
6. Тело бросили вертикально вверх с начальной скоростью 6,4 м/с. На какой высоте кинетическая и потенциальная энергии системы “Земля-тело” будут одинаковые?



**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Запишите в рабочем листке определения нижеприведенных понятий: “полная механическая энергия”, “закон сохранения полной механической энергии”, “однородность времени”, “закон сохранения полной энергии”.



### 3.6 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В АЗЕРБАЙДЖАНЕ (УРОК-ПРЕЗЕНТАЦИЯ)

Подготовьте электронную презентацию об использовании в нашей республике альтернативных источниках энергии. При подготовке презентации можно воспользоваться нижеприведенными электронными ресурсами:

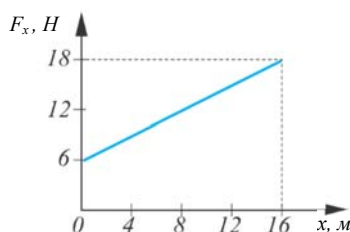
#### Электронные ресурсы:

1. [https://az.wikipedia.org/wiki/Kateqoriya:Azərbaycan\\_su\\_elektrik\\_stansiyaları](https://az.wikipedia.org/wiki/Kateqoriya:Azərbaycan_su_elektrik_stansiyaları).
2. [https://az.wikipedia.org/wiki/Mingəçevir\\_SES](https://az.wikipedia.org/wiki/Mingəçevir_SES).
3. [www.azerenerji.gov.az/index.php?option=com\\_content&view=article...](http://www.azerenerji.gov.az/index.php?option=com_content&view=article...)
4. [www.azerbaijans.com](http://www.azerbaijans.com) › Baş səhifə › İQTİSADİYYAT.
5. [www.president.az/articles/8577](http://www.president.az/articles/8577).
6. [www.president.az/articles/3184](http://www.president.az/articles/3184).
7. [www.minenergy.gov.az/?e=526](http://www.minenergy.gov.az/?e=526).
8. <http://www.azerbaijan-news.az/index.php?Lng=aze&year=2009&Pid=183>.
9. [www.osce.org/az/baku/40023?download=true](http://www.osce.org/az/baku/40023?download=true).
10. [lib.aliyevheritage.org/az/3316976.html](http://lib.aliyevheritage.org/az/3316976.html).
11. [eco.gov.az/.../405-azerbaycan-respublikasında-alternativ-ve-berpa-olunan-enerji-men...](http://eco.gov.az/.../405-azerbaycan-respublikasında-alternativ-ve-berpa-olunan-enerji-men...)
12. [www.carecprogram.org/uploads/docs/AZE-Renewable-Energy-Strategy-az.pdf](http://www.carecprogram.org/uploads/docs/AZE-Renewable-Energy-Strategy-az.pdf).
13. [www.bizimyol.info/news/61753.html](http://www.bizimyol.info/news/61753.html).
14. [axar.az/m/view.php?id=64300](http://axar.az/m/view.php?id=64300).
15. [www.qlobalenerji.az/page.php?sh=dHVrZW5tel9lbnJq](http://www.qlobalenerji.az/page.php?sh=dHVrZW5tel9lbnJq).
16. [https://az.wikipedia.org/wiki/Külək\\_enerjisi](https://az.wikipedia.org/wiki/Külək_enerjisi).
17. [www.qlobalenerji.az/page.php?sh=YXpfa2xrX2Vu](http://www.qlobalenerji.az/page.php?sh=YXpfa2xrX2Vu).
18. [https://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/.../TYqdimat\\_Strategiya.pdf](https://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/.../TYqdimat_Strategiya.pdf).
19. [referat.ilkaddimlar.com/d\\_word\\_refe\\_hidro\\_5030.docx](http://referat.ilkaddimlar.com/d_word_refe_hidro_5030.docx).
20. [azertag.az/.../Azerbaycanda\\_kulek\\_ve\\_gunes\\_enerjisinden\\_istifade\\_uchun](http://azertag.az/.../Azerbaycanda_kulek_ve_gunes_enerjisinden_istifade_uchun)
21. [www.xalqgazeti.com/az/news/economy/40986](http://www.xalqgazeti.com/az/news/economy/40986).
22. [www.anspress.com/iqtisadiyyat/07.../kulek-enerjisi-azerbaycana-baha-basa-gelmeyece...](http://www.anspress.com/iqtisadiyyat/07.../kulek-enerjisi-azerbaycana-baha-basa-gelmeyece...)
23. [apa.az/.../azerbaycanda-gunes-ve-kulek-enerjisinden-genis-istifade-olunmasi-meqsedil...](http://apa.az/.../azerbaycanda-gunes-ve-kulek-enerjisinden-genis-istifade-olunmasi-meqsedil...)
24. [www.anl.az/down/meqale/azerbaycan/2010/aprel/114197.htm](http://www.anl.az/down/meqale/azerbaycan/2010/aprel/114197.htm).
25. [www.feedly.today/.../azerbaycanda-kulek-ve-gunes-enerjisinden-istifade-ucun-elveris..](http://www.feedly.today/.../azerbaycanda-kulek-ve-gunes-enerjisinden-istifade-ucun-elveris..)
26. [regionplus.az/az/articles/view/5036](http://regionplus.az/az/articles/view/5036).
27. [news.atv.az/news/tech/14925-alternativ-energetika-kulek-enerjisinin-gucu](http://news.atv.az/news/tech/14925-alternativ-energetika-kulek-enerjisinin-gucu).
28. [deyerler.org/100916-alternativ-enerji-mjnbjlrjri-kgljk-enerjisi-ii-yazd.html](http://deyerler.org/100916-alternativ-enerji-mjnbjlrjri-kgljk-enerjisi-ii-yazd.html).
29. [e-book.az>book/1834...azerbaycanda...enerjisinden...ve...](http://e-book.az>book/1834...azerbaycanda...enerjisinden...ve...)
30. [az.wikipedia.org>Günəş\\_enerjisi](http://az.wikipedia.org>Günəş_enerjisi).
31. [ebooks.az>book\\_YqyCx9Ul.html](http://ebooks.az>book_YqyCx9Ul.html).
32. [carecprogram.org/uploads/docs/AZE-Renewable-...](http://carecprogram.org/uploads/docs/AZE-Renewable-...)
33. [news.lent.az>news/134868](http://news.lent.az>news/134868).
34. [yeniazerbaycan.com>SonXeber\\_e13759\\_az.html](http://yeniazerbaycan.com>SonXeber_e13759_az.html).
35. [physics.gov.az>PowerEng/2004/v1/article/art01.pdf](http://physics.gov.az>PowerEng/2004/v1/article/art01.pdf).
36. [qlobalenerji.az>page.php...](http://qlobalenerji.az>page.php...)
37. [webcityhost.net>vergiler/upload/File/art-293.pdf](http://webcityhost.net>vergiler/upload/File/art-293.pdf).
38. [minenergy.gov.az>db/462.pdf](http://minenergy.gov.az>db/462.pdf).
39. [news.day.az>Azərbaycan>797906.html](http://news.day.az>Azərbaycan>797906.html).
40. [arxiv.az>...azertag...2841297/AVROPADA\\_ATOM...DINC...ILE...](http://arxiv.az>...azertag...2841297/AVROPADA_ATOM...DINC...ILE...)
41. [az.wikipedia.org>Nüvə\\_energetikası](http://az.wikipedia.org>Nüvə_energetikası).
42. [azrefs.org>xulase-tedqiqatn-meqsedini-v2.html...](http://azrefs.org>xulase-tedqiqatn-meqsedini-v2.html...)

## Образцовый план подготовки презентации

<b>I слайд:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Название презентации</li> <li>• Подготовил</li> </ul>
<b>II слайд:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Состояние использования источников естественной альтернативной энергии в Азербайджане</li> </ul>
<b>III слайд:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• История использования энергии текущей воды в Азербайджане</li> <li>• Использование энергии течение воды в Азербайджане в наши дни</li> </ul>
<b>IV слайд:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• История использования энергии ветра</li> <li>• Использование энергии ветра в Азербайджане в наши дни</li> </ul>
<b>V слайд:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Перспективы использования энергии течения воды и ветра в Азербайджане</li> </ul>
<b>VI слайд:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Использование энергии Солнца в Азербайджане в наши дни</li> <li>• Перспективы использования энергии Солнца в Азербайджане</li> </ul>
<b>VII слайд:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Перспективы использования атомной энергии в Азербайджане</li> <li>• Перспективы использования энергии геотермальных вод в Азербайджане</li> </ul>

- 3.1. Мальчик массой 50 кг, стоящий на льду в коньках, бросает в горизонтальном направлении снежок массой 1 кг со скоростью 5 м/с. Какую скорость в это время получит мальчик?
- 3.2. Локомотив массой 150 тонн приближается к неподвижному составу массой 1250 тонн со скоростью 7 м/с. Какую скорость приобретает состав после соединения с локомотивом?
- 3.3. Летящий со скоростью 500 м/с снаряд, взорвавшись, разделяется на два осколка с массами 5 кг и 15 кг, соответственно. Большой осколок продолжил полет со скоростью 800 м/с в том же направлении, что и снаряд. Определите скорость малого осколка.
- 3.4. Мальчик массой 60 кг, бегущий со скоростью 2 м/с, догоняет и запрыгивает на тележку массой 40 кг, движущуюся со скоростью 1 м/с. С какой скоростью продолжит движение тележка с мальчиком?
- 3.5. Дан график зависимости проекции силы, действующей на движущееся вдоль оси ОХ тело, от перемещения. Определите работу, совершенную этой силой на пути 12 м.



- 3.6. Мальчик, действуя с постоянной силой, направленной под углом  $60^\circ$  к горизонту, переместил игрушечную машинку по горизонтальной дороге на 40 м. С какой силой мальчик тянет машинку, если работа, совершенная этой силой, равна 2 кДж?

- 3.7. Мальчик бросил мяч массой 100 г вертикально вверх, а затем поймал его в точке броска. Приняв во внимание, что мяч во время движения вверх поднялся на высоту 5 м, вычислите работу, совершенную силой тяжести, действующей на мяч ( $g = 10 \text{ м/с}^2$ ) для случая: а) при движении мяча вверх; б) при движении мяча вниз; с) на всем пути движения мяча.
- 3.8. Можно ли поднимать груз массой 30 кг со скоростью 4 м/с при помощи электрического двигателя мощностью 0,9 кВт ( $g = 10 \text{ м/с}^2$ )?
- 3.9. Камень массой 500 гр бросают вертикально вверх со скоростью 20 м/с. Чему будет равна кинетическая энергия камня через 1 с и 2 с (сопротивление воздуха не учитывать;  $g = 10 \text{ м/с}^2$ )?
- 3.10. Как изменится кинетическая энергия автобуса при увеличении его скорости в 2 раза?
- 3.11. Шарик массой 25 гр, двигаясь со скоростью 5 м/с, ударяется о пружину жесткостью  $10^3 \text{ Н/м}$ . Определите величину деформации пружины.



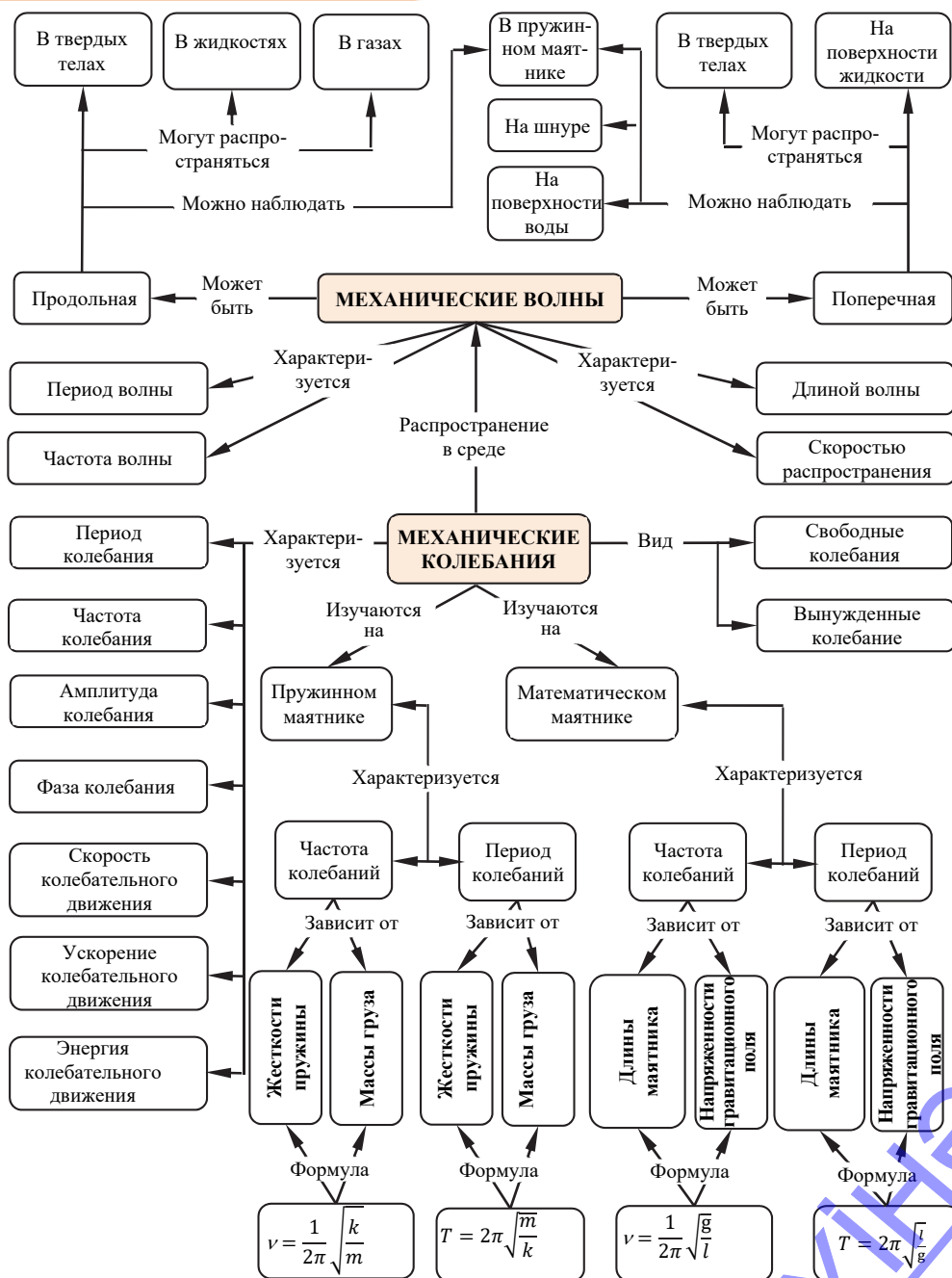
- 3.12. Вылетевшая из винтовки со скоростью 600 м/с, пуля массой 5 гр пробивает деревянную доску насквозь и вылетает из нее со скоростью 200 м/с. Определите работу, совершенную силой сопротивления доски.
- 3.13. Пружина динамометра жесткостью 100 Н/м деформирована на 2 см. Определите потенциальную энергию деформированной пружины.
- 3.14. Как изменяются кинетическая и потенциальная энергия тела, если сила тяжести, действующая на него, совершает отрицательную работу?
- 3.15. Как изменяются кинетическая и потенциальная энергия тела, если сила тяжести, действующая на него, совершает положительную работу?
- 3.16. При равномерном поднятии камня из колодца глубиной 4 м на поверхность совершается работа 150 Дж. Определите массу камня ( $g = 10 \text{ м/с}^2$ ).
- 3.17. Кинетическая энергия тела, брошенного вертикально вниз с высоты 75 м со скоростью 10 м/с, в момент удара о Землю равна 1600 Дж. Определите массу тела и его скорость в момент удара о поверхность Земли (сопротивление воздуха не учитывается  $g = 10 \text{ м/с}^2$ ).
- 3.18. Тело массой 250 гр бросили вертикально вверх со скоростью 15 м/с. Определите максимальную высоту подъема и потенциальную энергию тела на этой высоте (сопротивление воздуха не учитывается  $g = 10 \text{ м/с}^2$ ).
- 3.19. Какую скорость сообщает пружинный пистолет пуле массой 3 гр при распрямлении сжатой на 10 см пружины? Жесткость пружины 100 Н/м.
- 3.20. Стальной шарик бросили вертикально вверх со скоростью 20 м/с. Определите высоту, на которой кинетическая и потенциальная энергия шарика равны друг другу ( $g = 10 \text{ м/с}^2$ ; сопротивление воздуха не учитывать).

# МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Освоив материалы этой главы –  
**ВЫ СУМЕЕТЕ:**

- перечислить признаки гармонических колебаний;
- различать виды механических колебаний и волн;
- определять основные характеристики механических колебаний и волн;
- составлять и решать качественные и количественные задачи с применением зависимости между характеристиками механических колебаний и волн;
- объяснить причину возникновения механических колебаний в пружинном и математическом маятниках;
- записать уравнения колебаний пружинного и математического маятников, экспериментально и теоретически установить от каких величин зависят период и частота этих маятников;
- определить по графику гармонических колебаний период, частоту, циклическую частоту, амплитуду колебаний, максимальные значения скорости и ускорения;
- определить экспериментально и теоретически причину возникновения в упругой среде поперечных и продольных колебаний;
- построить и “прочитать” графики зависимости характеристик механических волн от времени.

ЛАЙН



## 4.1 КОЛЕБАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ. СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Предприимчивый лесник, для защиты пчелиного улья от медведя использует тяжелое бревно, подвешенное на крепкой ветке. Бревно помещается чуть ниже улья, перекрывая дорогу медведю. Влезающий на дерево медведь вынужден отталкивать в сторону бревно.



- Что происходит после этого? Сможет ли медведь подняться к улью? Почему?
- Каким словом можно характеризовать такое движение бревна? Можно ли назвать такое движение свободным или вынужденным?

### Исследование-1

**Задача 1.** Определите, что является общим, а что нет для следующих движений: “Движение пловца по поверхности воды”, “Движение Луны вокруг Земли”, “Движение качелей”, “Движение пилы при распиливании дерева”, “Движение груза на пружинном динамометре”, “Движение поршня в цилиндре двигателя”, “Движение “волчка” на поверхности стола”.

#### Обсуждение результатов:

- Движения каких систем представлены в этих предложениях?
- Чем отличаются и что общего в движении этих систем?

**Механическое колебательное движение.** Одно из наиболее распространенных движений в природе – *механическое колебательное движение*.

• **Механическое колебательное движение** – это полностью или частично повторяющееся движение тела в противоположных направлениях около положения устойчивого равновесия. Другими словами: *механическое колебательное движение – это перемещение то в одном, то в другом направлении вокруг положения равновесия тела или системы тел.*

Колебательное движение может быть периодическим и непериодическим:

- **Периодическое колебательное движение** – это колебания тела или системы тел, повторяющиеся через одинаковые промежутки времени.
- **Непериодическое колебательное движение** – это колебания тела или системы тел, повторяющиеся через произвольные промежутки времени. У таких колебаний определенных периодов нет.

Периодические колебания в основном бывают двух видов: *вынужденные и свободные колебания*.

- **Вынужденные колебания** – это колебания, возникающие в результате воздействия внешней периодически изменяющейся силы.
- **Свободные колебания** – это колебания, возникающие в результате действия внутренних сил замкнутой системы.

**Свободные колебания.** Для простоты проведения измерений и вычислений при изучении колебательного движения удобно воспользоваться замкнутой системой. В замкнутой системе тела совершают колебательные движения в результате действия внутренних сил.

Колебания груза, прикрепленного к пружине (*система пружина-груз*), или тела, подвешенного на нити (*система нить-тело*), можно отнести к свободным колебаниям. Внутренней силой в системе пружина-груз является сила упругости пружины, в системе нить-тело – сила тяжести, действующая на тело.

**Кинематические характеристики колебательного движения.** Ознакомимся с некоторыми из них.

• **Смещение** – это физическая величина, показывающая, в какую сторону и на сколько удаляется от положения равновесия колеблющееся тело за определенный промежуток времени. Например,



предположим, что тело массой  $m$  совершает повторяющиеся периодические движения вокруг точки равновесия  $O$ , вправо

и влево от нее, вдоль оси  $X$ . Координата тела  $x$  в данный момент времени  $t$  показывает смещение этого тела от его положения равновесия (а).

• **Амплитуда** – это наибольшее смещение колеблющегося тела от положения равновесия. Амплитуда обозначается  $x_m$  или  $A$ , а единица ее измерения в СИ – метр ( $m$ ).

Если тело, двигаясь вправо от точки равновесия  $O$ , смещается на амплитуду  $x_m$  (точка  $N$ ), затем, остановившись на мгновение, возвращается в точку  $O$ , движется влево, смещаясь до точки с координатой  $-x_m$  (точка  $M$ ), и остановившись в этой точке на мгновение, снова вернется в точку  $O$ , то это движение тела называется *одно полное колебание* (см: а). Таким образом, тело за время одного полного колебания проходит путь, равный 4 амплитудам:

$$l = 4x_m.$$

Если тело за промежуток времени  $t$  совершит  $N$  колебаний, то пройденный им путь будет равен:

$$l = 4x_m N = 4x_m t \nu = 4x_m \cdot \frac{t}{T}. \quad (4.1)$$

Где  $\nu$  (ню) – частота колебаний,  $T$  – период колебаний.

• **Частота колебаний** – это физическая величина, численно равная числу колебаний за одну секунду:

$$\nu = \frac{N}{t}. \quad (4.2)$$

За единицу измерения частоты колебания в СИ принята величина, названная в честь немецкого ученого Генри Герца, *герц* (Гц). 1 Гц – это частота таких колебаний, при которых за 1с совершается 1 колебание:  $[\nu] = 1 \text{ Гц} = 1 \text{ с}^{-1}$ .

• **Период колебаний** – это время, за которое совершается одно полное колебание:

$$T = \frac{t}{N}. \quad (4.3)$$

Единица измерения периода в СИ – секунда (1 с):  $[T] = 1 \text{ с}$ .

Период и частота колебаний – взаимно обратные величины:

$$T = \frac{1}{\nu} \text{ или } \nu = \frac{1}{T}. \quad (4.4)$$

• **Циклическая частота**, являясь величиной в  $2\pi$  раза большей частоты колебаний, показывает, сколько колебаний совершает тело за 6,28 секунды ( $2\pi \approx 6,28$ ):

$$\omega = 2\pi \nu. \quad (4.5)$$

Здесь  $\omega$  (омега) – циклическая частота. Единица измерения циклической частоты в СИ:

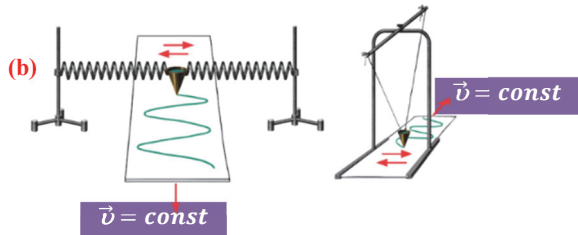
$$[\omega] = 1 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$



**Гармоническое колебание и его график.** Самым простым колебательным движением является *гармоническое колебание*.

• **Гармонические колебания** – это колебания, при которых величины, характеризующие движение, изменяются со временем по закону синуса или косинуса.

Изменения положения тела, совершающего свободные гармонические колебания, описываются кривой, которая является *синусоидой* или *косинусоидой*. Кривую синусоиды (или косинусоиды) с легкостью можно наблюдать во время проведения опыта как с пружинным, так и с нитевым маятником, представляющим собой наполненную песком воронку с небольшим отверстием внизу (b).

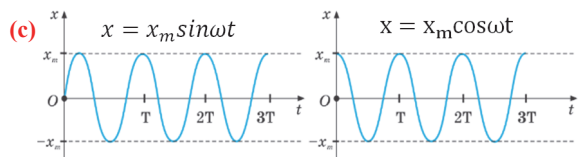


Эта кривая соответствует графику изменения перемещения маятника  $x$  от времени  $t$  по закону синуса или косинуса (c):

$$x = x_m \sin \omega t \quad (4.6)$$

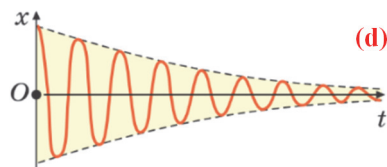
или

$$x = x_m \cos \omega t \quad (4.7)$$



Из графика видно, что за время, равное периоду колебания ( $t=T$ ), маятник совершает одно полное колебание (см: c).

• **Внимание** • Отсутствие действия внешних сил на замкнутую систему приводит к тому, что ее полная механическая энергия не изменяется. Это означает, что в идеальных условиях амплитуда свободных колебаний в замкнутой системе не изменяется, то есть колебания не затухают. Однако в реальности свободные колебания затухают – под действием сил трения с течением времени полная механическая энергия системы уменьшается, то есть уменьшается амплитуда колебаний и колебания затухают (d).



• **Затухающие колебания** – это колебания в замкнутой колебательной системе, в которой в результате действия сил трения происходит постепенное уменьшение полной механической энергии системы и уменьшение амплитуды колебаний.

## Исследование-2. Применение

### Определение характеристик маятника

**Задача 2.** Материальная точка, совершая колебания вдоль прямой линии с частотой 2 Гц, проходит за 2 секунды путь в 4 см. Чему равна амплитуда колебаний этой материальной точки?

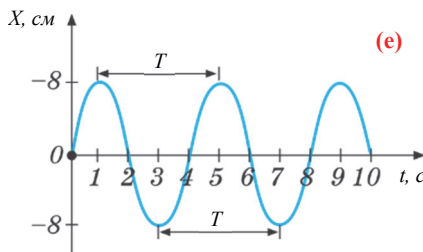
### Обсуждение результатов:

- Что общего и чем отличаются амплитуда и перемещение маятника?
- Чему равен путь, пройденный маятником, колеблющимся вдоль прямой линии, за промежуток времени  $t$  при определенной частоте колебаний?

**Применение в повседневной жизни:** Можете ли показать примеры колебательных систем, встречаемых в живой и неживой природе?

**Провести самооценку:**

1. Какие понятия повторили на уроке? Что из этого вы хорошо поняли, а что осталось вам не ясным?
2. Какое движение называют механическими колебаниями?
3. Какие колебания называют свободными? Можно ли назвать их затухающими? Ответ обоснуйте.
4. Что выражают, соответственно, частота и амплитуда колебаний?
5. Дан график зависимости перемещения от времени для системы, совершающей гармонические колебания (е). Определите период, частоту и амплитуду колебаний.



**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Запишите в рабочем листке определения нижеприведенных понятий: “механическое колебательное движение”, “периодическое колебательное движение”, “свободные колебания”, “перемещение при колебательном движении”, “амплитуда”, “частота колебаний”, “период колебаний”, “циклическая частота”, “затухающие колебания”, “гармонические колебания”.

## 4.2 ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ ПРУЖИННОГО МАЯТНИКА

В 1985 году в городе Мехико произошла ужасная катастрофа, причина которой было землетрясение: 5526 человек погибли, 40 000 человек ранены, 31000 человек остались без крова. Из проведенных затем исследований ученые выяснили, что главной причиной разрушений во время землетрясения является совпадение частоты свободных колебаний зданий с частотой вынужденных колебаний Земли. Поэтому при возведении новых зданий в сейсмически активной зоне необходимо, чтобы эти частоты не совпадали. Это даст возможность уменьшить последствия землетрясения. С этой целью важно знать, от чего зависят частота и период колебаний.

● **От чего могут зависеть период и частота колебаний колебательной системы?**

### Исследование-1. Исследование колебаний пружинного маятника

**Оборудование:** две пружины с разными жесткостями, набор грузов, секундомер, штатив с муфтой и зажимом.

**Ход исследования:**

#### I. Исследование зависимости периода и частоты колебания от амплитуды колебаний пружинного маятника.

1. Закрепите один из концов пружины в зажиме штатива, а другой конец пружины, подвесив на него груз в 100 гр, приведите в колебательное движение с небольшой амплитудой  $x_{m1}$ .
2. Измерьте секундомером время  $t_1$ , затраченное на  $N = 10$  полных колебаний (а).
3. Определите частоту и период колебаний пружинного маятника при помощи формул:

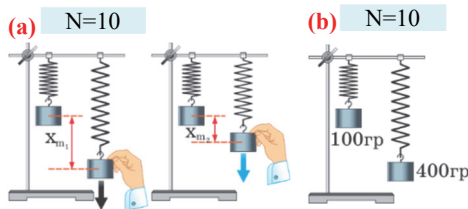
$$\nu_1 = \frac{N}{t_1}, T_1 = \frac{t_1}{N}.$$

4. Незначительно уменьшите амплитуду колебания ( $x_{m2}$ ) пружинного маятника и, повторив опыт, вычислите период ( $T_2$ ) и частоту ( $\nu_2$ ) колебания.
5. Сравните между собой значения периодов колебания  $T_1$  и  $T_2$  и частоты колебания  $\nu_1$  и  $\nu_2$  пружинного маятника.

## II. Исследование зависимости периода и частоты колебания пружинного маятника от массы груза.

1. Подвесив к пружинному маятнику груз массой 100 г, приведите его в колебательное движение с небольшой амплитудой колебания  $x_{m1}$ , и измерьте при помощи секундомера время, затраченное на  $N = 10$  полных колебаний.
2. Определите период  $T_1$  и частоту  $\nu_1$  колебания маятника.
3. Вычислите  $T_2$  и  $\nu_2$ , повторив опыт с грузом 400 г (b).
4. Занесите результаты измерений и вычислений в таблицу 4.1 и сравните нижеприведенные соотношения:

$$\frac{T_2}{T_1} \text{ и } \frac{m_2}{m_1}; \quad \frac{\nu_2}{\nu_1} \text{ и } \frac{m_2}{m_1}.$$



## III. Исследование зависимости периода и частоты колебания от жесткости пружины маятника.

1. На две пружины с разными жесткостями подвесьте грузы по 100 г.
2. Обе пружины приведите в колебательное движение и вычислите  $T_1$  и  $\nu_1$ , измерив время, затраченное на 10 полных колебаний.
3. Повторите опыт с грузом 400 г и вычислите  $T_2$  и  $\nu_2$  (c).
4. Занесите результаты измерений и вычислений в таблицу 4.1 и сравните нижеприведенные соотношения:

$$\frac{T_2}{T_1} \text{ и } \frac{k_2}{k_1}; \quad \frac{\nu_2}{\nu_1} \text{ и } \frac{k_2}{k_1}.$$

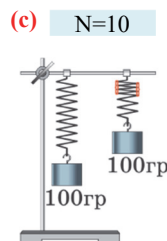


Таблица 4.1

№	$m$ , кг	N	$t$ , с	$T$ , с	$\nu$ , Гц	$\frac{T_2}{T_1}$	$\frac{\nu_2}{\nu_1}$	$\frac{m_2}{m_1}$	$\frac{k_2}{k_1}$
1	0,1	10							
2	0,4								

### Обсуждение результатов:

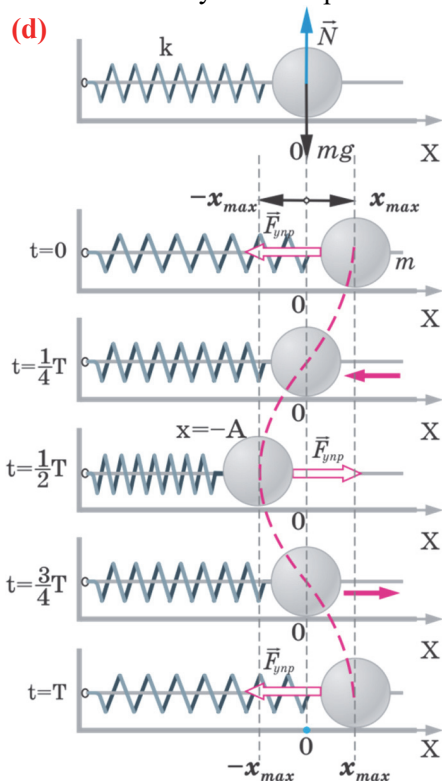
1. Как зависят период и частота колебаний пружинного маятника от амплитуды?
2. Как зависят период и частота колебаний пружинного маятника от массы подвешенного к пружине груза?
3. Как зависят период и частота колебаний пружинного маятника от жесткости пружины?

Одной из простейших колебательных систем, совершающих гармонические колебания, является *пружинный маятник*.

- *Пружинный маятник – это колебательная система, состоящая из пружины и закрепленного на ней тела. Колебания, возникающие в пружинном маятнике, являются гармоническими колебаниями:*
- *Под гармоническими колебаниями подразумеваются колебания, возникающие под действием силы, прямо пропорциональной перемещению и направленной против направления перемещения.*

Исследование колебаний пружинного маятника имеет большое практическое значение, например, при вычислении колебаний рессор автомобиля при езде; в исследовании воздействия колебаний на фундамент зданий и тяжелых

станков, в определении эластичности ушных перепонки при диагностике лор-заболеваний. По этой причине изучение колебаний пружинного маятника является актуальной проблемой.



С целью уменьшения количества сил, действующих на колебательную систему, целесообразно использовать горизонтально расположенную колебательную систему пружина-шарик (d). В этой системе действия силы тяжести и реакции опоры уравниваются друг друга. При выведении шарика из состояния равновесия, например, при растяжении пружины до положения  $x = x_m$ , сила упругости, возникающая в ней, сообщает шарiku ускорение и приводит его в колебательное движение. По II закону Ньютона уравнение движения маятника можно записать так:

$$ma_x = -kx_m, \quad (4.8)$$

или

$$a_x = -\frac{k}{m}x_m. \quad (4.9)$$

Формула (4.9) является уравнением свободных гармонических колебаний пружинного маятника.

Где  $m$  – масса шарика, закрепленного на пружине,  $a_x$  – проекция ускорения шарика вдоль оси  $X$ ,  $k$  – жесткость пружины,  $x_m$  – удлинение пружины, равное амплитуде колебания.

Для данной колебательной системы отношение  $\frac{k}{m}$  – постоянная положительная величина (так как масса и жесткость не могут быть отрицательными). При сравнении уравнения колебаний (4.9) пружинного маятника с выражением для другого вида периодического движения – известным выражением центростремительного ускорения при равномерном движении по окружности (см.: физика-10, тема 1.8) получается, что отношение  $\frac{k}{m}$  соответствует квадрату циклической частоты ( $\omega^2$ ):

$$\begin{cases} a_x = -\frac{k}{m}x_m \\ a_n = \omega^2 R \end{cases} \rightarrow \omega^2 = \frac{k}{m}, \quad (4.10)$$

или

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4.11)$$

Таким образом, уравнение движения пружинного маятника можно записать и так:

$$a_x = -\omega^2 x_m. \quad (4.12)$$

Уравнение (4.12) показывает, что колебания пружинного маятника с циклической частотой  $\omega$  являются свободными гармоническими колебаниями. Из математики известно, что решением этого уравнения является:

$$x = x_m \cos(\omega t + \varphi_0)$$

Так как тригонометрическая функция является гармонической функцией, то и колебания пружинного маятника являются гармоническими колебаниями.

Здесь  $\omega t + \varphi_0 = \varphi$  фаза колебания,  $\varphi_0$  – начальная фаза. Единица измерения фазы в СИ – *радиан* (1 рад). Фазу также можно измерять в градусах:  $\pi$  (рад) =  $180^\circ$ .

Значение начальной фазы зависит от выбора начального момента времени. Начальный момент времени можно выбрать так, чтобы  $\varphi_0 = 0$ . В этом случае формулу гармонических колебаний пружинного маятника можно записать так:

$$x = x_m \cos \omega t \text{ или } x = x_m \sin \omega t. \quad (4.13)$$

Из сравнения выражений (4.11) и (4.5) определяются величины, от которых зависят период и частота колебаний пружинного маятника:

$$\begin{cases} \omega = 2\pi \nu \\ \omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \end{cases} \rightarrow \nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (4.14)$$

$$T = \frac{1}{\nu} \rightarrow T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (4.15)$$

Из выражений (4.14) и (4.15) видно, что период и частота пружинного маятника зависят от жесткости пружины и массы груза, подвешенного к нему.

#### Исследование-2. Применение. Как изменятся период и частота колебания?

**Задача.** Как изменятся частота и период колебаний пружинного маятника, если амплитуду его колебаний увеличить в 2 раза, а массу груза, подвешенного к пружине, уменьшить в 2 раза?

#### Обсуждение результатов:

- Как период и частота колебаний пружинного маятника зависят от амплитуды колебаний и массы груза?

**Применение в повседневной жизни:** Какие параметры упругих рессор, связанные с осью вращения колес автомобиля, вагона и самолета, необходимо принять во внимание при их создании?

#### Провести самооценку:

1. Какие понятия повторили на уроке? Что из этого вы хорошо поняли, а что осталось вам не ясным?
2. От каких величин зависит период колебания пружинного маятника? Представьте графики этих зависимостей.
3. От каких величин зависит частота колебания пружинного маятника? Представьте графики этих зависимостей.
4. От каких величин зависит циклическая частота пружинного маятника? Представьте графики этих зависимостей.

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Дайте краткое объяснение нижеприведенных понятий: “пружинный маятник”, “период колебания пружинного маятника”, “частота колебания пружинного маятника”.

## 4.3 ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

До наших дней дошла такая историческая информация: однажды в 1583 году итальянский ученый Г.Галилей, находясь в храме города Пиза, обратил внимание на колебательное движение люстры, подвешенной на длинном тросе. Он, сравнивая колебания люстры со своим пульсом, определил, что, несмотря на уменьшение амплитуды колебания, время, затрачиваемое на одно полное колебание (период колебания) люстры, не изменяется. Затем Галилей в результате многочисленных проведенных исследований, изменяя длину нитевого маятника, массу подвешенного к нему груза, высоту расположения маятника (по сравнению с уровнем моря), определил, от чего зависят период и частота колебаний маятника.



- **Предложите свою гипотезу: К каким результатам привели исследования Галилея – от чего зависят период и частота колебаний нитевого маятника?**

### Исследование-1. Исследование колебаний нитевого маятника

**Оборудование:** маленький шарик, закрепленный на длинной нити, линейка, секундомер, штатив с муфтой и зажимом.

**Ход исследования:**

#### I. Исследование зависимости периода и частоты колебания нитевого маятника от амплитуды.

1. Поместите штатив на край стола. Свободный конец нити с шариком закрепите в зажиме штатива так, чтобы шарик находился от пола на высоте 1-2 см (а).
2. Измерьте расстояние от точки закрепления свободного конца нити в зажиме штатива до центра шарика (длина маятника), оно должно быть порядка 160 см.
3. Приведите в колебательное движение маятник с малой амплитудой колебания  $x_{m1}$ , и измерьте секундомером время  $t_1$  затраченное на совершение  $N=5$  полных колебаний.
4. Определите период и частоту нитевого маятника при помощи формул  $T_1 = t_1/N$  и  $\nu_1 = N/t_1$ , соответственно.
5. Незначительно увеличьте амплитуду маятника ( $x_{m2}$ ) и, повторив опыт, вычислите период ( $T_2$ ) и частоту ( $\nu_2$ ) колебаний.
6. Сравните периоды  $T_1$  и  $T_2$ , а также частоты  $\nu_1$  и  $\nu_2$  колебаний нитевого маятника.



#### II. Исследование зависимости периода и частоты колебания нитевого маятника от массы подвешенного груза.

1. Замените шарик на нити другим, с несколько большей массой. Приведите в колебательное движение маятник с той же малой амплитудой колебания  $x_{m1}$  и измерьте секундомером время  $t_2$ , затраченное на совершение  $N=5$  полных колебаний.

2. Определите период  $T'_2$  и частоту  $\nu'_2$  колебаний.
3. Сравните периоды  $T_1$  и  $T'_2$ , а также частоты  $\nu_1$  и  $\nu'_2$  колебаний нитевого маятника.

#### III. Исследование зависимости периода и частоты колебания нитевого маятника от длины маятника.

1. Намотав нить на держатель штатива, укоротите длину маятника в 4 раза и приведите в колебательное движение маятник с той же малой амплитудой колебания  $x_{m1}$ . Измерьте секундомером время, затраченное на совершение  $N=5$  полных колебаний.
2. Определите период  $T'_2$  и частоту  $\nu'_2$  колебаний.
3. Запишите проведенные измерения и вычисления в таблицу 4.2 и сравните нижеприведенные соотношения:

$$\frac{T_2''}{T_1} \text{ и } \frac{l_2}{l_1}; \quad \frac{\nu_2''}{\nu_1} \text{ и } \frac{l_2}{l_1}.$$

Таблица 4.2

№	$l, \text{м}$	$N$	$t, \text{с}$	$T, \text{с}$	$\nu, \text{Гц}$	$\frac{T_2''}{T_1}$	$\frac{\nu_2''}{\nu_1}$	$\frac{l_2}{l_1}$
1	1,60	5						
2	0,4							

**Обсуждение результатов:**

- Как период и частота колебаний нитевого маятника зависят от амплитуды и массы груза?
- Как период и частота колебаний нитевого маятника зависят от длины маятника?
- К какому выводу можно прийти из исследования?

Гармонические колебания возникают также под действием силы тяжести. Это можно наблюдать с помощью *математического маятника*.

• **Математический маятник** – это идеализированная колебательная система, состоящая из материальной точки, подвешенной на невесомой и нерастяжимой нити.

Для исследования колебаний математического маятника можно использовать систему, состоящую из тонкой длинной нити и шарика (b). Сила тяжести ( $m\vec{g}$ ), действующая на шарик в положении равновесия маятника, уравнивается силой натяжения нити ( $\vec{T}$ ). Однако, если вывести маятник из состояния равновесия, сместив его на малый угол  $\alpha$  в сторону, то возникают две составляющие вектора силы тяжести – направленная вдоль нити  $\vec{F}_{\parallel}$  и перпендикулярная нити  $\vec{F}_{\perp}$ . Сила натяжения  $\vec{T}$  и составляющая силы тяжести  $\vec{F}_{\parallel}$  уравниваются друг друга. Поэтому равнодействующая сила будет равна составляющей  $\vec{F}_{\perp}$ , “пытающейся” вернуть тело в положение равновесия (см.: рис. b). Учитывая вышеуказанное и ссылаясь на II закон Ньютона, можно написать уравнение колебательного движения тела массой  $m$  в проекциях на ось OX:

$$ma_x = -F_{\perp}.$$

Приняв во внимание, что:

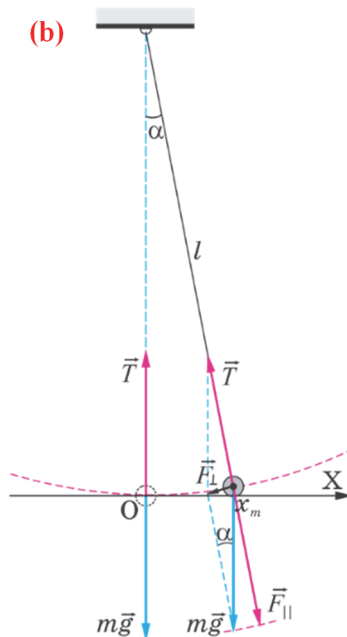
$$\begin{cases} F_{\perp} = mgsin\alpha, \\ sin\alpha = \frac{x_m}{l} \text{ (при малых значениях угла смещения } \alpha \text{)}. \end{cases}$$

Для уравнения движения математического маятника получим:

$$a_x = -\frac{g}{l}x_m. \quad (4.16)$$

Где  $l$  – длина математического маятника (нити),  $g$  – ускорение свободного падения,  $x_m$  – амплитуда колебания.

Для данной колебательной системы отношение  $\frac{g}{l}$  – постоянная положительная величина, потому что ускорение свободного падения и длина нити не могут быть





отрицательными. Если сравнить уравнения (4.16) и (4.10), с легкостью можно увидеть, что отношение  $\frac{g}{l}$  также соответствует квадрату циклической частоты ( $\omega^2$ ):

$$\omega^2 = \frac{g}{l}, \quad (4.17)$$

или

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}. \quad (4.18)$$

Таким образом, уравнение движения математического маятника можно записать и так:

$$a_x = -\omega^2 x_m. \quad (4.19)$$

Уравнение (4.19) показывает, что колебания математического маятника являются гармоническими колебаниями с циклической частотой  $\omega$ . Из математики вы знаете, что решением этого уравнения является нижеприведенная функция:

$$x = A \sin(\omega t + \varphi_0).$$

Так как эта функция является гармонической, то и колебания математического маятника являются гармоническими колебаниями.

Отсюда определяются величины, от которых зависят период и частота колебаний математического маятника:

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}, \quad (4.20)$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (4.21)$$

Таким образом, период и частота колебаний математического маятника зависят от длины маятника и напряженности гравитационного поля в данной точке.

#### Исследование-2. Применение. Каков период колебаний?

**Задача.** Определите период и частоту колебаний математического маятника длиной 225 см. Сколько времени затрачивает этот маятник на 20 полных колебаний (сопротивление воздуха не учитывать;  $g = 9 \frac{m}{c^2}$ ;  $\pi = 3$ )?

**Обсуждение результатов:** • Скольким секундам равен период математического маятника и как вы его определили?

**Применение в повседневной жизни:** При отставании или “забегании вперед” настенных часов с маятником его настраивают, изменяя длину маятника.

- Как нужно изменить длину маятника при “забегании вперед” настенных часов? Почему?

**Провести самооценку:** 1. Какие понятия повторили на уроке? Что из этого вы хорошо поняли, а что осталось вам не ясным? 2. От чего зависит период колебаний математического маятника? Представьте зависимость графически. 3. От чего зависит частота колебаний математического маятника? Представьте зависимость графически. 4. От чего зависит циклическая частота колебаний математического маятника? Представьте зависимость графически.



**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Дайте краткое объяснение нижеприведенных понятий: “математический маятник”, “период колебаний математического маятника”, “частота колебаний математического маятника”.

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ  
ПРИ ПОМОЩИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

**Цель:** Усвоить навык определения ускорения свободного падения на основе формулы  $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$  периода колебания математического маятника.

**Оборудование:** маленький шарик, подвешенный на длинной ( $\approx 160$  см) нити, измерительная лента (или рулетка), секундомер, штатив с муфтой и зажимом.

**Ход исследования:**

1. Поместите штатив на край стола, затем подвесьте к нему маятник так, чтобы шарик находился на высоте 1–2 см от пола.
2. Измерьте расстояние от точки закрепления свободного конца нити в зажиме штатива до центра шарика (длина маятника), оно должно быть порядка 160 см.
3. Отклонив маятник на расстояние 5 см от положения равновесия, отпустите его и измерьте при помощи секундомера время, затраченное на  $N=10$  полных колебаний. Занесите результаты измерений в таблицу 4.3.
4. Повторив опыт еще два раза при тех же условиях, определите значение среднего времени, затраченного на  $N=10$  полных колебаний и вычислите среднее значение периода колебания.

$$t_{\text{cp}} = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{3};$$

$$T_{\text{cp}} = \frac{t_{\text{cp}}}{N}.$$

5. Вычислите среднее значение ускорения свободного падения ( $\pi = 3,14$ ):

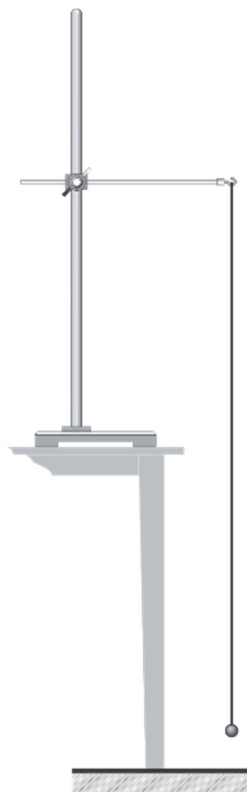
$$g_{\text{cp}} = \frac{4\pi^2 l}{T_{\text{cp}}^2}.$$

Таблица 4.3

№	$l$ , см	N	$t$ , с	$t_{\text{cp}}$ , с	$T_{\text{cp}}$ , с	$g_{\text{cp}}$ , м/с <sup>2</sup>
1	160	10				
2	160	10				
3	160	10				

6. Занесите все результаты в таблицу и вычислите относительную погрешность ( $g = 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ ):

$$\varepsilon = \frac{|g_{\text{cp}} - g|}{g} \cdot 100\%.$$

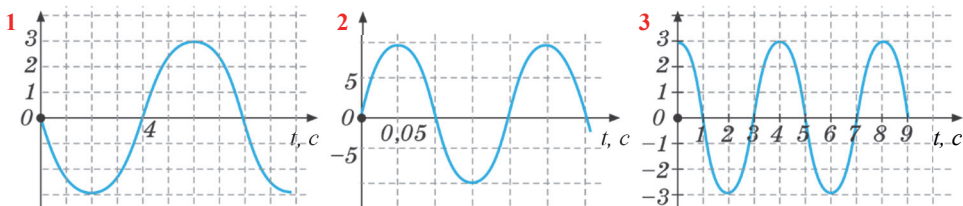


Вы уже знакомы с основными тригонометрическими функциями и умеете строить графики тригонометрических уравнений, описывающих гармонические колебания (см.: математика-10).

- Что означает изменение величины по гармоническому закону?
- Какие методы построения графиков тригонометрических функций вы знаете?
- В каких физических процессах можно практически применить построения графиков тригонометрических функций?

## Исследование-1. Математика – правая рука физики!

**Задача-1.** Определите соответствие: каким тригонометрическим уравнениям соответствуют графики?



а)  $x = x_m \cos \omega t$ ; б)  $f(t) = -\cos 2t$ ; в)  $f(t) = -3 \sin \omega t$ ; д)  $x = 10 \sin \omega t$ ; е)  $f(t) = 3 \cos \omega t$ .

**Обсуждение результатов:**

- Какой из графиков изменяется по закону синуса, а какой по закону косинуса? Почему?

При гармонических колебаниях маятника его смещение изменяется по гармоническому закону, поэтому не трудно доказать, что его скорость и ускорение также изменяются по гармоническому закону. Предположим, что смещение изменяется по закону косинуса и начальная фаза равна нулю

$$(\varphi_0 = 0): x = A \cos \omega t.$$

Так как скорость является первой производной смещения (координат) по времени, то:

$$v_x = x' = (A \cos \omega t)' = -A\omega \cdot \sin \omega t = A\omega \cdot \cos \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right), \quad (4.22)$$

или

$$v_x = -v_m \sin \omega t. \quad (4.23)$$

Как видно из выражения (4.23), скорость, изменяющаяся по гармоническому закону, опережает колебания смещения по фазе на  $\frac{\pi}{2}$  (а).

Максимальное (амплитудное) значение скорости зависит от амплитуды, частоты и периода колебаний:

$$v_m = \omega A = 2\pi \nu A = \frac{2\pi}{T} A. \quad (4.24)$$

Так как ускорение является первой производной скорости по времени, то получим:

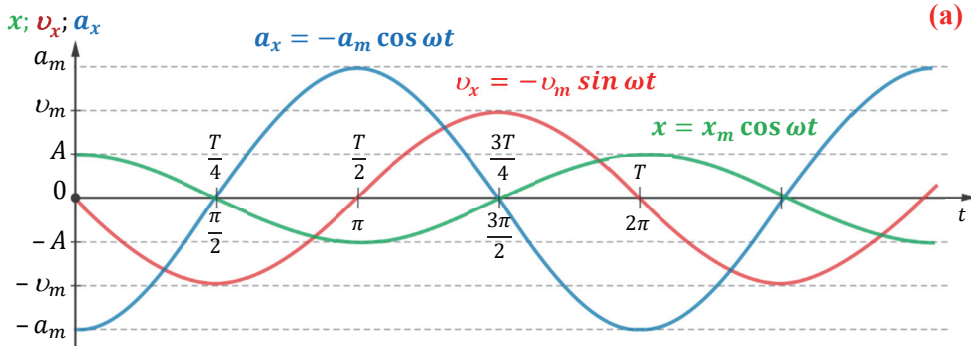
$$a_x = v_x' = (-A\omega \cdot \sin \omega t)' = -A\omega^2 \cdot \cos \omega t = A\omega^2 \cdot \cos(\omega t + \pi) \quad (4.25)$$

или

$$a_x = -a_m \cos \omega t. \quad (4.26)$$

Как видим, колебания ускорения, изменяющегося по гармоническому закону, опережают колебания скорости по фазе на  $\frac{\pi}{2}$ , а колебания смещения на  $\pi$  (см.: рис. а). Максимальное (амплитудное) значение ускорения зависит от амплитуды, частоты и периода колебаний:

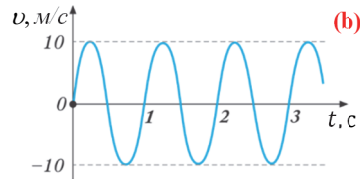
$$a_m = \omega^2 A = 4\pi^2 \nu^2 A = \frac{4\pi^2}{T^2} A. \quad (4.27)$$



### Исследование-2. Применение

#### Исследуйте график

**Задача 2.** На рисунке представлен график изменения скорости колебания по гармоническому закону (b). Определите: а) амплитудное значение скорости; б) частоту колебаний; в) период колебаний.



#### Обсуждение результатов:

- Что означает изменение скорости колебания по гармоническому закону?
- Как вы определили амплитудное значение скорости, частоту и период колебания?

#### Применение в повседневной жизни:

На практике графики гармонических колебаний наиболее часто используются в медицинской диагностике, радиоэлектронике, на предприятиях, производящих точные приборы, и в других областях.

- Каким способом и с какой целью используются графики гармонических колебаний в этих областях? Можете использовать электронные ресурсы.

#### Провести самооценку:

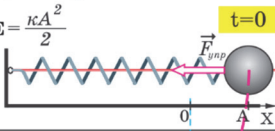
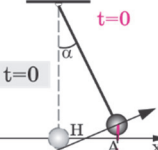
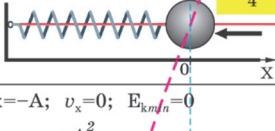
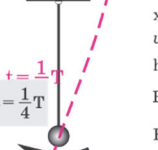
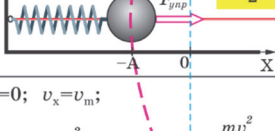
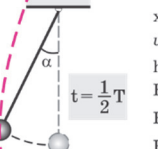
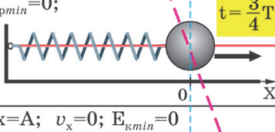
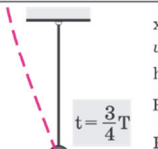
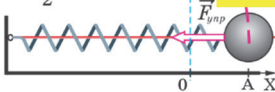
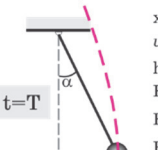
1. Какие понятия повторили на уроке? Что из этого вы хорошо поняли, а что осталось вам не ясным?
2. От чего зависит амплитудное значение скорости гармонических колебаний?
3. Как амплитудное значение ускорения гармонических колебаний зависит от времени?
4. Чему равны, соответственно,  $x$ ,  $v_x$ ,  $a_x$  при гармоническом колебательном движении в момент времени  $t = \frac{T}{2}$  в случае  $\varphi_0 = 0$  (см: а)?

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Дайте краткое объяснение нижеприведенных понятий: “математический маятник”, “период колебания математического маятника”, “частота колебания математического маятника”.

## 4.5 ПРЕВРАЩЕНИЯ ЭНЕРГИИ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЯХ (УРОК-ПРЕЗЕНТАЦИЯ)

Подготовьте электронную презентацию о превращениях энергии при гармонических колебаниях. При подготовке презентации внимательно исследуйте таблицу 4.4 и ознакомьтесь с информацией, данной под заголовком “Теоретический материал”.

Таблица 4.4

Превращения энергии в пружинном маятнике	Превращения энергии в математическом маятнике	Последовательность процессов в системе
$x=A; v_x=0; E_{kmin}=0$ $E_{pmax} = \frac{\kappa A^2}{2}$ $E = \frac{\kappa A^2}{2}$ 	$x=A$ $v_x=0$ $h=H$ $E_{kmin}=0$ $E_{pmax} = mgH$ $E = mgH$ 	В начальный момент $t=0$ маятник отклонен от положения равновесия на расстояние $x=A$ и находится в состоянии покоя ( $v_x=0$ ). Системе сообщается дополнительная потенциальная энергия. Полная механическая энергия равна максимальной потенциальной.
$x=0; v_x=v_m$ $E_{kmax} = \frac{mv_m^2}{2}$ $E_{pmin}=0$ $E = \frac{mv_m^2}{2}$ 	$x=0$ $v_x=v_m$ $h=0$ $E_{kmax} = \frac{mv_m^2}{2}$ $E_{pmin}=0$ $E = \frac{mv_m^2}{2}$ 	Система начнет двигаться влево в сторону положения равновесия. В момент времени $t = \frac{1}{4}T$ система проходит положение равновесия, смещения маятника становятся равным нулю, а скорость становится максимальной. Потенциальная энергия системы равна нулю, а кинетическая максимальна. Полная энергия равна максимальной кинетической.
$x=-A; v_x=0; E_{kmin}=0$ $E_{pmax} = \frac{\kappa A^2}{2}$ $E = \frac{\kappa A^2}{2}$ 	$x=-A$ $v_x=0$ $h=H$ $E_{kmin}=0$ $E_{pmax} = mgH$ $E = mgH$ 	В момент времени $t = \frac{1}{2}T$ система находится в левом крайнем положении ( $x=-A$ ) и скорость становится равной нулю. Потенциальная энергия приобретает максимальное значение, кинетическая энергия убывает до нуля. Полная энергия равна максимальной потенциальной.
$x=0; v_x=v_m$ $E_{kmax} = \frac{mv_m^2}{2}$ $E_{pmin}=0$ $E = \frac{mv_m^2}{2}$ 	$x=0$ $v_x=v_m$ $h=0$ $E_{kmax} = \frac{mv_m^2}{2}$ $E_{pmin}=0$ $E = \frac{mv_m^2}{2}$ 	Система начинает двигаться вправо к положению равновесия. В момент времени $t = \frac{3}{4}T$ система находится в положении равновесия, смещение равно нулю, скорость максимальна. Потенциальная энергия системы равна нулю, кинетическая энергия максимальна. Полная энергия равна максимальной кинетической.
$x=A; v_x=0; E_{kmin}=0$ $E_{pmax} = \frac{\kappa A^2}{2}$ $E = \frac{\kappa A^2}{2}$ 	$x=A$ $v_x=0$ $h=H$ $E_{kmin}=0$ $E_{pmax} = mgH$ $E = mgH$ 	В момент времени, равный периоду $t = T$ , система возвращается в первоначальное положение колебания ( $x=A, v_x=0$ ). Кинетическая энергия равна 0. Полная энергия равна максимальной потенциальной.

**Теоретический материал.** Потенциальная и кинетическая энергия свободных гармонических колебаний в замкнутой системе периодически превращаются друг в друга.

В таблице 4.4 дано сравнение превращений энергий в пружинном и математическом маятниках. Как видно из таблицы, потенциальная энергия колебательной системы в точке возвращения ( $x = A$ ) имеет максимальное значение:

$$E_{p \max} = \frac{kA^2}{2}. \quad (4.28)$$

Если же маятник находится в точке равновесия, потенциальная энергия минимальна:

$$E_{p \min} = 0.$$

Кинетическая энергия системы, наоборот, в точке возвращения минимальна ( $E_{k \min} = 0$ ), а в точке равновесия максимальна:

$$E_{k \max} = \frac{mv^2}{2}. \quad (4.29)$$

На рисунке (а) даны графики зависимости потенциальной и кинетической энергии при гармоническом колебательном движении от смещения.

Полная механическая энергия замкнутой колебательной системы в произвольный момент времени  $t$  остается постоянной (трение не учитывается):

а) для пружинного маятника:

$$E = E_k + E_{\text{п}} = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2};$$

б) для математического маятника:

$$E = E_k + E_{\text{п}} = \frac{mv^2}{2} + mgh.$$

Если принять во внимание изменение смещения и скорости по гармоническому закону в формулах потенциальной и кинетической энергии колебательного движения, то станет очевидно, что при гармонических колебаниях эти энергии так же изменяются по гармоническому закону (б):

$$E_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2} = \frac{kA^2}{2} \cos^2(\omega t + \varphi_0), \quad (4.30)$$

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{m\omega^2 A^2}{2} \sin^2(\omega t + \varphi_0) = \frac{kA^2}{2} \sin^2(\omega t + \varphi_0). \quad (4.31)$$

Как было отмечено выше, полная энергия системы не изменяется по гармоническому закону:

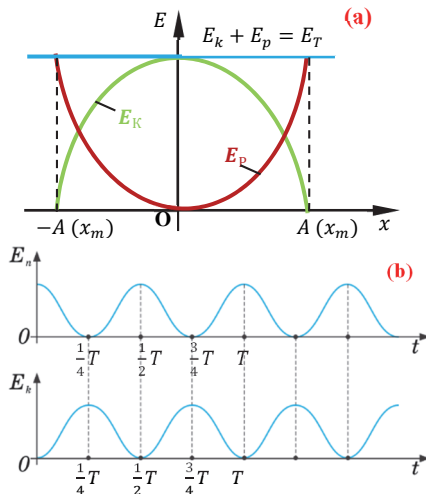
$$E_T = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2} = \frac{kA^2}{2} \cos^2(\omega t + \varphi_0) + \frac{kA^2}{2} \sin^2(\omega t + \varphi_0) = \frac{kA^2}{2}. \quad (4.32)$$

• Полная энергия гармонических колебаний прямо пропорциональна квадрату амплитуды колебаний.

Если же в системе существует сила трения, то его полная энергия не сохраняется – изменение полной механической энергии равно работе силы трения. В результате колебания затухают:  $\Delta E_{\text{полн}} = A_{\text{тр}}$ .

Образец плана подготовки презентации

I слайд:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Название презентации</li> <li>• Подготовил</li> </ul>
II–IV слайды:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Превращения энергии в пружинном маятнике</li> </ul>
V–VII слайды:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Превращения энергии в математическом маятнике</li> </ul>

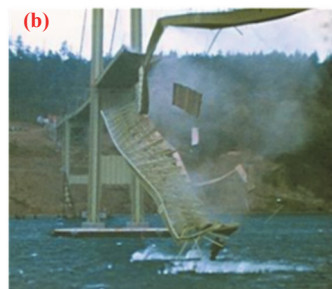


<b>VIII слайд:</b>	• Описание изменения потенциальной энергии с помощью формулы и графика гармонических колебаний по гармоническому закону
<b>IX слайд:</b>	• Описание изменения кинетической энергии с помощью формулы и графика гармонических колебаний по гармоническому закону
<b>X слайд</b>	• Сохранение полной механической энергии замкнутой системы, совершающей гармонические колебания

## 4.6 Вынужденные колебания. РЕЗОНАНС

Наверно, вы слышали о двух необычных исторических событиях:

- Когда в 1905 году в городе Санкт-Петербург (Россия) по висячему цепному Египетскому мосту длиной 55 м проходил кавалерийский эскадрон, пролеты моста неожиданно рухнули на лед реки Фонтантка (а).
- В 1940 году в один из ветреных дней подвесной мост “Такома” длиной 1810 м, построенный через пролив Такома-Херроуз (США), разрушился (б).



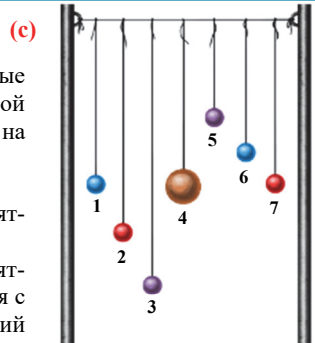
- Что общего в произошедших событиях и могут ли быть эти события связаны с колебательным движением?

### Исследование-1. Какой из маятников колеблется с большей амплитудой?

**Оборудование:** 2 штатива с муфтой или две опоры, закрепленные на одном основании, толстая нить, нитевые маятники разной длины (масса шарика на одном из маятников больше, чем на других маятниках).

**Ход исследования:**

1. Закрепите на опорах, сильно натянув, толстую веревку, а маятники подвесьте на ней, как показано на рисунке (с).
2. Приведите в свободное колебательное движение крайний маятник (1-й или 7-й). Определите, какой из маятников колеблется с амплитудой и частотой, равной амплитуде и частоте колебаний 4 маятника с шариком большей массы.



**Обсуждение результатов:**

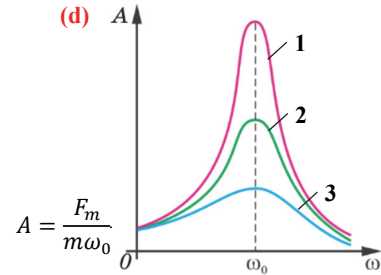
- Какой из маятников совершает свободные, а какой вынужденные колебания? Почему?
- Какой маятник колеблется с той же частотой, что и маятник 4? Почему?
- Какой маятник совершает колебания с большей амплитудой? Почему?

Под действием изменяющейся по гармоническому закону внешней силы (например,  $F = F_m \cos \omega t$ ) в колебательной системе создаются вынужденные колебания.

- Частота вынужденных колебаний всегда совпадает с частотой изменения вынуждающей силы – с какой частотой изменяется внешняя сила, с такой же частотой колеблется система.



- Амплитуда вынужденных колебаний зависит от частоты вынуждающей силы. При приближении значения частоты вынуждающей силы к значению частоты свободных колебаний системы амплитуда колебаний увеличивается (d). При равенстве этих частот ( $\omega = \omega_0$ ) наблюдается:
- Резонанс – резкое возрастание амплитуды вынужденных колебаний системы.



Форма резонансной кривой зависит от значения силы трения в системе. Так, при малых значениях силы трения резонансная кривая выше (1-я кривая), а при больших значениях силы трения, наоборот, резонансная кривая ниже (3-я кривая).

Исследуем это теоретически с помощью горизонтального пружинного маятника: предположим, что шарик массой  $m$  совершает вынужденные колебания под действием внешней силы, изменяющейся по закону

$$F = F_m \cos \omega t \text{ (e).}$$

Уравнение вынужденных колебаний маятника с учетом II закона Ньютона можно записать так:

$$m a_x = -kx + F_m \cos \omega t.$$

Если в этом уравнении принять во внимание формулы смещения и ускорения, изменяющихся по периодическому закону  $x = A \cos \omega t$

и

$$a_x = -\omega^2 A \cos \omega t,$$

то:

$$-m\omega^2 A \cos \omega t = -kA \cos \omega t + F_m \cos \omega t,$$

или

$$-m\omega^2 A = -kA + F_m.$$

Если же принять во внимание

$$k = m\omega_0^2,$$

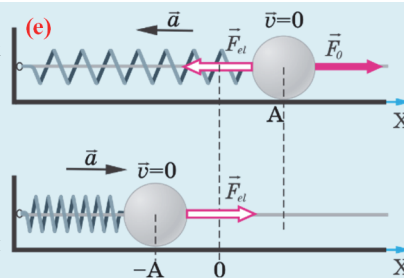
то:

$$-m\omega^2 A = -m\omega_0^2 A + F_m$$

Или

$$A = \left| \frac{F_m}{m(\omega^2 - \omega_0^2)} \right|. \quad (4.33)$$

Где  $\omega_0$  – циклическая частота свободных колебаний колебательной системы,  $\omega$  – циклическая частота вынужденных колебаний,  $A$  – амплитуда вынужденных колебаний.



Из формулы (4.33) зависимости амплитуды колебаний от циклической частоты видно, что при явлении резонанса, если  $\omega = \omega_0$ , амплитуда колебания увеличивается до бесконечности:  $A = \left| \frac{F_m}{m(\omega^2 - \omega_0^2)} \right| = \frac{F_m}{0} \rightarrow \infty$ .

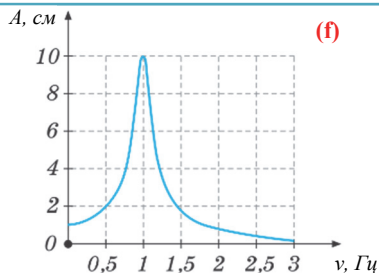
Резонанс вынужденных колебаний колебательной системы создает большую разрушительную силу, которая может быть причиной катастрофы. Например, если частота действия вынуждающей силы, создаваемая марширующей через мост войсковой частью, совпадает с частотой свободных колебаний моста, то амплитуда вынужденных колебаний моста резко увеличивается, что может привести к его разрушению. По этой причине при переходе через мосты солдатам приказывают идти вольным шагом.

### Исследование-2. Применение

#### Исследуйте резонансную кривую

**Задача.** Определите период свободных колебаний системы на основании данной резонансной кривой (f).

**Обсуждение результатов:** 1. Сколько  $\Gamma_{ц}$  составляет частота свободных колебаний системы? 2. Как определили период свободных колебаний системы? 3. Чем равна резонансная амплитуда вынужденных колебаний системы?



**Применение в повседневной жизни:** Как вы знаете, движение поршня в цилиндре автомобильного двигателя является колебательным движением. К какому виду колебаний относится колебательное движение поршня в цилиндре: свободным или вынужденным? Почему?

**Провести самооценку:** 1. Какие понятия повторили на уроке? Что из этого вы хорошо поняли, а что осталось вам не ясным? 2. В чем причина разрушения “Египетского моста” в Санкт-Петербурге? 3. По какой причине разрушился мост “Такома” в США? 4. От чего зависит амплитуда вынужденных колебаний? 5. При каких условиях возникает резонанс? 6. Какой фактор определяет высоту резонансной кривой?

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Дайте краткое объяснение нижеприведенных понятий: “вынужденные колебания”, “амплитуда вынужденных колебаний”, “резонанс”.

## 4.7 РАСПРОСТРАНЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ В УПРУГОЙ СРЕДЕ: МЕХАНИЧЕСКАЯ ВОЛНА

Как вы знаете, во время землетрясения скорость распространения продольных волн Р-типа, возникающих внутри Земли, больше скорости распространения поперечных волн L-типа, возникающих на поверхности Земли. На основании разности между этими скоростями ученые-сейсмологи определяют расстояние от точки расположения сейсмографа до эпицентра землетрясения (см.: физика-7, стр.143).

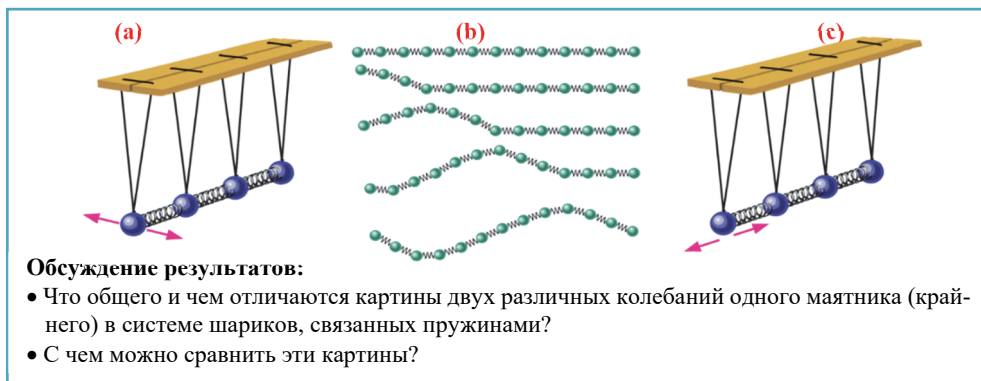
- Что такое волна и только ли в твердых телах она возникает?
- Что переносится волной: вещество или энергия?
- От чего зависит скорость распространения волны?

### Исследование-1. Что происходит в связанных колебательных системах?

**Оборудование:** модель, состоящая из связанных пружинами шариков; мобильный телефон.

**Ход исследования:**

1. Поместите модель на поверхность стола. Сместив крайний левый шарик в горизонтальной плоскости от положения равновесия, приведите его в колебательное движение (a).
2. Сфотографируйте сверху мобильным телефоном картину колебаний шариков, связанных пружинами, возникшую в горизонтальной плоскости (b).
3. Остановите колебательное движение системы и приведите крайний левый шарик в горизонтальное колебание вдоль цепочки шариков (c). Сфотографируйте возникшую в этом случае картину колебания связанных шариков с боковой стороны, то есть в вертикальной плоскости.
4. Распечатав фотографии на принтере, вклейте их в рабочий листок, и исследуйте, чем похожи, а чем нет возникшие картины колебательного движения колебательной системы шариков, связанных пружинами.



**Волна.** Механические колебания были изучены в разных замкнутых колебательных системах – пружинном и математическом маятниках. Однако в природе наиболее часто встречающимися колебаниями являются колебания в *связанных колебательных системах*. В связанных колебательных системах колебания передаются от одной части системы к другой. Например, при падении камня на поверхность стоячей воды наблюдается возникновение концентрических водяных кругов, которые расходятся из точки падения камня во все стороны. Кажется, что вода перемещается в пространстве в форме чередования выпуклостей и впадин. Однако, если расположить около точки падения камня поплавки или теннисный мячик, то наблюдается только его колебательное движение вверх-вниз на одном месте. Таким образом, возникающие в определенной точке колебательные движения частичек воды, передаваясь соседним частичкам воды вызывают колебательные движения все новых и новых частичек воды, и создают распространяющиеся во все стороны, колебательные движения системы связанных частичек. При таком распространении, называемом *волной*, перенос воды не происходит, а переносится только форма ее движения

• **Волна** – это процесс распространения колебаний в пространстве с течением времени.

В это время в среде происходят следующие явления: а) колебательные движения частичек среды, в которой распространяется волна – частички среды совершают колебательные движения только вокруг положения своего равновесия, и в волне не происходит перенос вещества; б) взаимодействия частичек среды с соседними частичками – в результате взаимодействия между частичками происходит перенос энергии. По этой причине волне можно дать следующее определение:

• Волна – это процесс переноса энергии без переноса вещества.

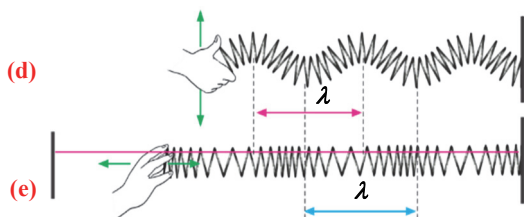
**Механическая волна.** В природе наиболее часто встречается механическая волна.

• **Механическая волна** – это процесс распространения механических колебаний в среде (механическая волна в вакууме не распространяется). Механические волны распространяются только в упругих средах (твердых телах, жидкостях и газах).

• **Упругие волны** – это процесс распространения механических колебаний в упругой среде. Этот процесс происходит с частотой, соответствующей частоте

колебания источника, создающего эту волну. За пределами среды упругие волны не существуют. Волны бывают двух видов: поперечные и продольные.

• **Поперечная волна** – это волна, распространяющаяся перпендикулярно направлению колебательного движения частиц среды. Поперечные волны могут распространяться только в твердых телах и по поверхности жидкостей. Поперечные волны распространяются в среде в форме сменяющих друг друга выпуклостей и впадин (d).



• **Продольная волна** – это волна, распространяющаяся вдоль направления колебательного движения частиц среды. Продольные волны могут распространяться во всех средах (твердых телах, жидкостях и газах). Продольные волны распространяются в среде в форме сменяющих друг друга зон сгущения и разрежения среды. Например, пропустив через длинную пружину пластмассовую нить, закрепите горизонтально оба конца нити и один из концов пружины к опорам, затем, периодически двигая свободный конец пружины вправо-влево, можно наблюдать чередование зон сгущения и рассеивания колец пружины (e).

**Характеристика волны.** Колебания, происходящие в какой-либо точке среды, передаются в другие точки не мгновенно, а с определенной конечной скоростью, которая определяет скорость волны.

• **Скорость волны** – это скорость распространения колебаний в среде.

Так как волна в однородной среде распространяется равномерно, скорость волны будет равна:

$$v = \frac{l}{t}. \quad (4.34)$$

Где  $l$  – расстояние, на которое распространяется волна за время  $t$ :

$$l = v \cdot t.$$

Другими характеристиками волны являются частота, период и длина волны.

• **Частота волны (период)** – это частота (период) колебаний источника, создающего волну.

• **Длина волны** – это расстояние ( $l = \lambda$ ), на которое волна распространяется за время, равное одному периоду колебания ( $t = T$ ).

Приняв во внимание это определение в (4.34), получим выражение для скорости распространения волны:

$$v = \frac{\lambda}{T}, \quad (4.35)$$

или

$$v = \nu \cdot \lambda. \quad (4.36)$$

Где  $\lambda$  (лямбда) – длина волны, в СИ единица ее измерения – метр. Из последних двух формул можно определить длину волны:

$$\lambda = v \cdot T; \quad \lambda = \frac{v}{\nu}. \quad (4.37)$$

Скорость волны не зависит от ее частоты и периода. Скорость волны зависит от свойств и агрегатного состояния среды. Длина волны в однородной среде

( $v = \text{const}$ ) прямо пропорциональна периоду колебаний и обратно пропорциональна частоте колебаний.

При переходе из одной среды в другую частота и период волны не меняются, однако так как скорость волны в разных средах разная, то длина волны меняется.

• **Длина волны** – это расстояние между двумя ближайшими точками, колеблющимися в одинаковых фазах. Длина волны в поперечных волнах равна расстоянию между двумя соседними точками вершин выпуклостей (или впадин) (см: **d**), в продольных же волнах, – расстоянию между двумя соседними точками зон сгущения (или разрежения) (см: **e**).

### Уравнение волны

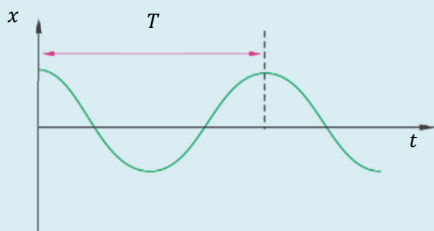
Предположим, что источник волны колеблется по гармоническому закону  $x = A \cos \omega t$ , колебательное движение распространяется со скоростью  $\vec{v}$  в окружающей источник среде, тогда в результате возникает волна, которая через определенный промежуток времени  $\tau$  (тау) достигнет точки, находящейся на расстоянии  $l$  от источника:

$$\tau = \frac{l}{v}.$$

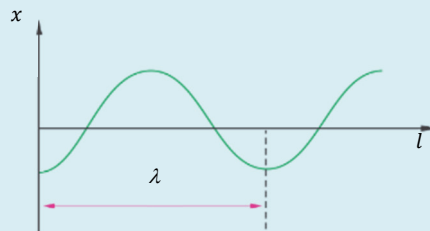
Это значит, что колебания в точке, находящейся на расстоянии  $l$  от источника, происходят по тому же закону и возникнут с опозданием на  $\tau$  секунд. Поэтому уравнение волны, достигшей произвольной точки на расстоянии  $l$  от источника колебания, можно записать так:

$$x = A \cos \omega(t - \tau) = A \cos \omega \left( t - \frac{l}{v} \right) = A \cos \frac{2\pi}{T} \left( t - \frac{l}{v} \right). \quad (4.38)$$

График волны по форме схож с графиком гармонических колебаний, однако это не одно и то же. Так, если график гармонических колебаний показывает изменение по гармоническому закону одной из характеристик колеблющейся точки, например, смещения от времени (**f**), то график волны – это картина расположения связанных точек среды в данный момент времени, то есть гармоничность этой волны в среде (**g**).



(f) – периодична по времени



(g) – периодична в среде

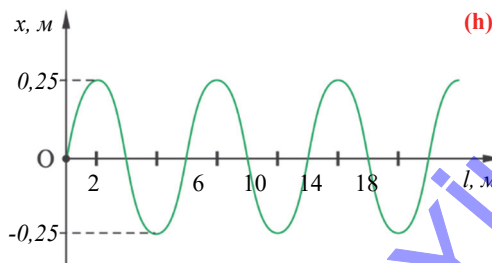
### Исследование-2. Применение

Решите графическую задачу.

**Задача.** Определите на основании графика волны его период и частоту (**h**). Скорость распространения волны 12 м/с.

**Обсуждение результатов:**

1. Какова длина волны?
2. По какой формуле определили частоту (или период) распространения волны?



**Применение в повседневной жизни:** Из проведенных исследований было определено, что выделяемая в результате выброса одной волны Атлантического океана, омывающего западное побережье Франции, энергия эквивалентна мощности удара в 75 миллионов киловатт.

- Можно ли воспользоваться энергией, переносимой волной океана? Если возможно, то каким способом?

**Провести самооценку:**

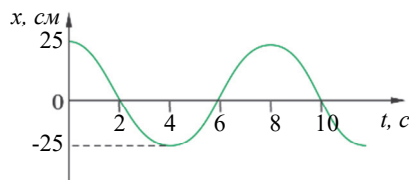
1. Какие понятия повторили на уроке? Что из этого вы хорошо поняли, а что осталось вам не ясным?
2. Чем отличается график колебательного движения от графика волны?
3. Почему механическая волна в среде распространяется, в вакууме – нет?
4. Чем схожи и чем отличаются поперечные и продольные волны?
5. Почему возникает разность фаз колебательного движения для разных точек механической волны?
6. Лодка качается на волне, которая распространяется со скоростью 4 м/с. Период колебания волны 3,2 с. Чему равна длина волны, на которой качается лодка?

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Запишите в рабочем листке определения нижеприведенных понятий: “волна”, “механическая волна”, “упругая среда”, “упругая волна”, “поперечная волна”, “продольная волна”, “скорость волны”, “частота волны”, “период волны”, “длина волны”, “график волны”.

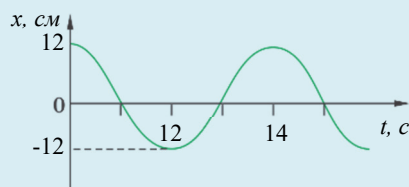
- 4.1. Маятник за 10 с проходит путь 80 А. Определите период колебания маятника (А – амплитуда колебания).
- 4.2. Скольким амплитудам будет равен путь маятника за 10 с, если частота его колебаний равна 0,5 Гц?
- 4.3. Колебательная система за 1 мин. совершает 90 колебаний. Чему равны период, частота и циклическая частота этой системы ( $\pi = 3$ )?
- 4.4. Сколько колебаний совершит маятник, период которого равен 0,2 с, за время 20 с? Чему равна частота и циклическая частота колебания этого маятника ( $\pi = 3$ )?
- 4.5. Пружинный маятник, амплитуда колебаний которого равна 0,2 м, совершает гармонические колебания с частотой 2 Гц. Запишите уравнение гармонических колебаний маятника.
- 4.6. Пружинный маятник, амплитуда колебаний которого равна 0,2 м, совершает гармонические колебания по закону синуса с частотой 2 Гц. Запишите уравнение гармонических колебаний ( $\pi = 3$ ;  $\varphi_0 = 0$ ).
- 4.7. Груз массой 100 гр, закрепленный на пружине, колеблется в горизонтальной плоскости без трения с частотой 2 Гц. Определите жесткость пружины ( $\pi = 3$ ).
- 4.8. Груз массой 250 гр, закрепленный на пружине жесткостью 16 Н/м, колеблется в горизонтальной плоскости без трения. Определите период колебаний пружины ( $\pi = 3$ ).
- 4.9. Определите длину математического маятника, период колебаний которого равен 1 с ( $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ ).
- 4.10. Математический маятник, амплитуда которого равна 5 см, совершает 150 колебаний за 1 мин. По какому закону изменяется координата маятника, если начальная фаза колебания равна  $45^\circ$  ( $\pi = 3$ ).
- 4.11. Координата колебательной системы изменяется по закону  $x = 4,5 \cos 4\pi t$ . Определите амплитуду и частоту колебаний.

4.12. Чему равна фаза колебаний маятника в момент времени 1,5 с, если период его колебаний равен 4 с ( $\varphi_0 = 0$ )?

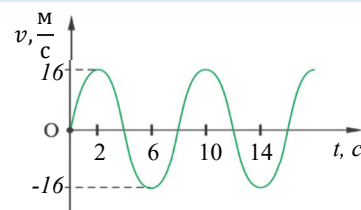
4.13. На рисунке дан график зависимости смещения от времени для материальной точки, совершающей гармонические колебания. Определите амплитудное значение скорости маятника ( $\pi=3$ ).



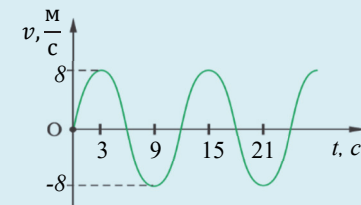
4.14. На рисунке дан график зависимости смещения от времени для материальной точки, совершающей гармонические колебания. Определите амплитудное значение ускорения маятника ( $\pi = 3$ ).



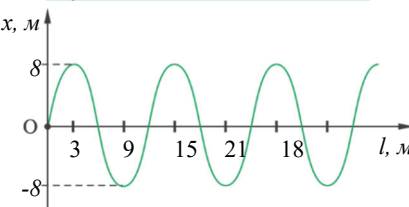
4.15. На рисунке дан график зависимости скорости от времени, для материальной точки, совершающей гармонические колебания. Определите амплитудное значение ускорения маятника ( $\pi = 3$ ).



4.16. На рисунке дан график зависимости скорости от времени для материальной точки, совершающей гармонические колебания. Определите амплитудное значение смещения маятника ( $\pi = 3$ ).



4.17. Определите по данному графику период, частоту и длину волны. Скорость распространения волны 240 м/с.



4.18. Вычислите длину волны, если скорость ее распространения 550 м/с, а период колебаний в ней 0,02 с.

4.19. Морская волна за 30 с 15 раз выбрасывается на берег. Скорость распространения волны 4 м/с. Определите длину морской волны.

4.20. Колебания в системе происходят по закону  $x = 7\cos 4\pi t$ . С какой частотой должна действовать вынуждающая сила, чтобы в системе возник резонанс?



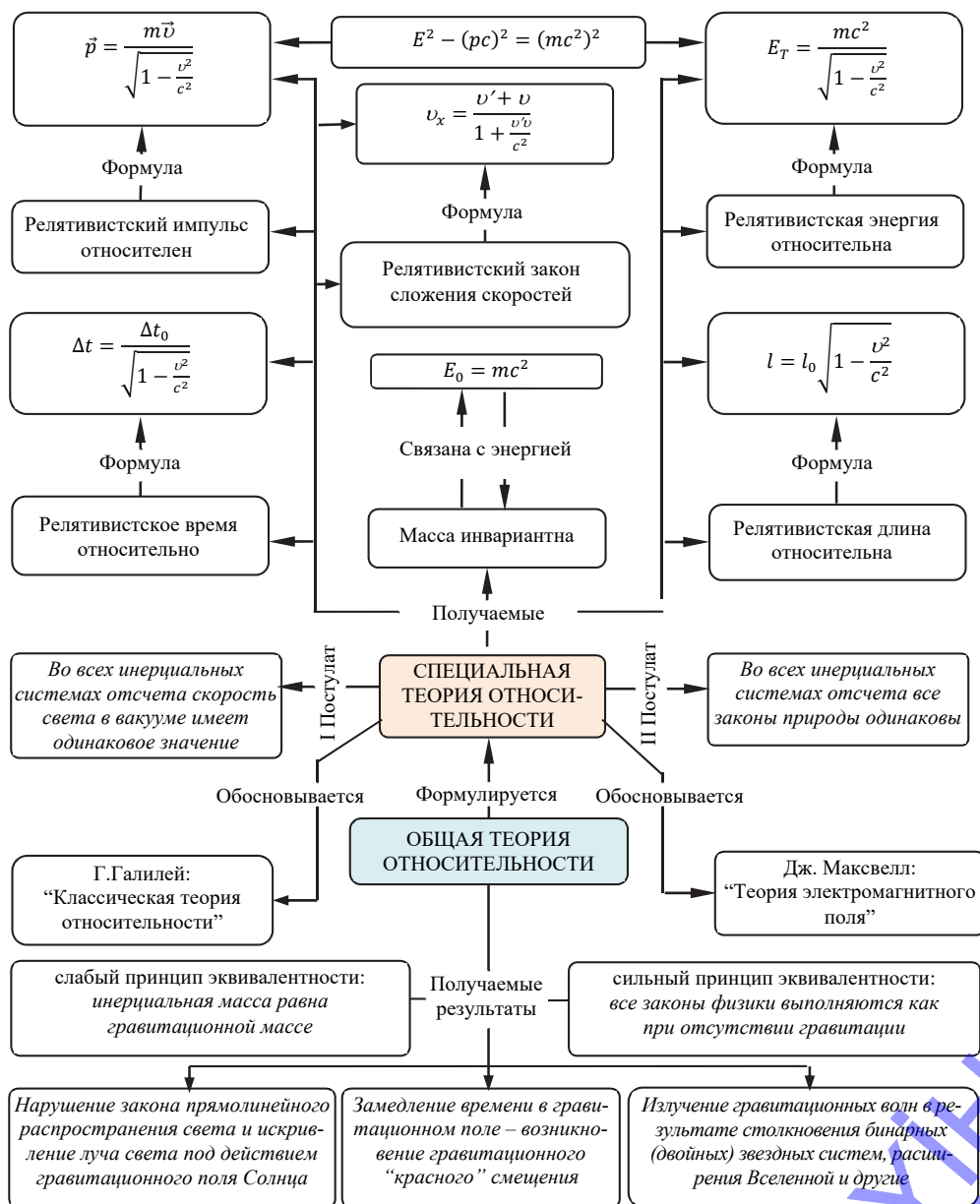
# РЕЛЯТИВИСТСКАЯ МЕХАНИКА

Освоив материалы этой главы –  
**ВЫ СУМЕЕТЕ:**

- различать понятия “пространство”, “время” и “движение” с точки зрения классической и релятивистской механики;
- объяснить научный смысл специальной теории относительности;
- объяснить существование фундаментальной связи между массой и энергией;
- объяснить относительность времени, длины, энергии и импульса, инвариантность массы, постоянство и конечность скорости света в вакууме во всех системах отсчета;
- решать задачи с применением специальной теории относительности.



## “Карта понятий” для V главы



## 5.1 ОСНОВЫ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

На календаре 29 декабря 2035 года. Через два дня международная команда астронавтов отправляется в межзвездный космический полет. Капитаном команды является 44-летний азербайджанец. Прощаясь с 16-летней дочкой Назрин, ученицей 10-го класса, он говорит: “Дочка, мы, перемещаясь равномерно в космосе со скоростью порядка 0,95 скорости света проведем исследования и вернемся на Землю через 20 лет. Если будем здоровы, то, когда встретимся, тебе будет 80 лет, а мне 64 года”.

Назрин с удивлением возразила: “Отец, ты говоришь о каком-то фантастическом явлении. Мне через 20 лет будет 36 лет”.

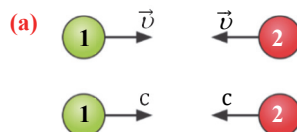
• Верно ли говорит Назрин? Почему?

### Исследование-1. Относительна ли скорость?

**Задача - 1.** Две частицы движутся навстречу друг другу со скоростью  $v = 10$  м/с. Чему равна скорость 1-й частицы относительно 2-ой (а)? Чему будет равна скорость 1-й частицы относительно 2-й, если эти частицы будут двигаться навстречу друг другу со скоростью, равной скорости света в вакууме ( $c = 3 \cdot 10^8$  м/с)?

**Обсуждение результатов:**

1. Чему будут равны скорости частиц относительно друг друга?
2. Может ли скорость частицы быть больше скорости света?



**Принцип относительности Галилея.** В 1636 году Г.Галилей, обобщая исследования по изучению движения тел, сформулировал *принцип относительности*:

- *Законы механики во всех инерциальных системах отсчета одинаковы.*

Этот принцип поставил определенные ограничения при составлении уравнений механического движения: *уравнения, выражающие механическое движение во всех инерциальных системах отсчета, имеют одинаковый вид.*

По этим представлениям, называемым *классическими*, пространство и время, характеризующие механическое движение, считаются *абсолютными* – линейные размеры тела не зависят от того, покоится тело или движется, *скорость же света* считается *бесконечно* большой величиной. Ньютоновская механика целиком была построена на этом принципе. Таким образом, в классической механике координата, время, длина и скорость тел относительно любой инерциальной системы отсчета были представлены в связанной компактной форме с помощью преобразований, называемых “Преобразованиями Галилея” (см.: таблица 5.1). Однако явлениям, возникающим при скоростях, близких к скорости света, например, в электромагнитных, гравитационных и внутриатомных процессах, классические представления не могут дать объяснения.

**Специальная теория относительности Эйнштейна.** Астрономические исследования, проведенные Олафом Рёмером в конце XVII века, лабораторные исследования Луи Физо в середине XIX века по определению скорости света и тогда же проведенные теоретические работы Дж.Максвелла по исследованию электромагнитного поля доказали конечность скорости распространения света. В начале XX века классический принцип относительности и результаты получаемые из него, были исследованы заново. Были определены формулы, связывающие физические величины, характеризующие пространство и время в

инерциальных системах отсчета, движущихся со скоростями, близкими к скорости света.

Обобщив все проведенные в этой области исследования, А.Эйнштейн в 1905 году сформулировал новую теорию – “Специальную теорию относительности” (СТО), тем самым заложив теоретическую основу *релятивистской механики*.

• **Релятивистская механика** – раздел физики, изучающий законы механики при движении тел со скоростями, сравнимыми со скоростью света.

Математическими расчетами Эйнштейн доказал, что при переходе от подвижной системы отсчета к неподвижной пространственно-временные координаты подвергаются соответствующим преобразованиям при помощи универсального множителя  $\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ , определенного Лоренцем (см.: таблица 5.1).

Основу СТО составляют два постулата:

• **I постулат:** Все законы физики одинаковы во всех инерциальных системах отсчета и ни одним физическим опытом невозможно отличить инерциальные системы друг от друга.

• **II постулат:** Скорость света в вакууме одинакова во всех инерциальных системах отсчета и не зависит от скорости движения источника и приемника света. Скорость света – максимальная скорость, существующая в природе.

В специальной теории относительности Эйнштейну удалось установить связь между пространством и временем и объединить их в единый пространственно-временной континуум – “пространство-время”. Это означает, что произвольное явление характеризуется свойствами не только пространства, где оно происходит, но и времени, характеризующим последовательность происходящих явлений.

Таблица 5.1

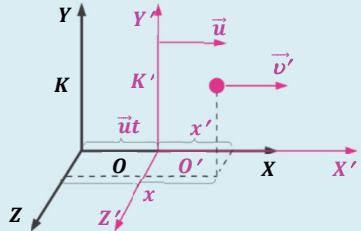
<p>Здесь: <b>а)</b> величины без штриха характеризуют данное явление, произошедшее в неподвижной системе отсчета <math>K</math>; <b>б)</b> величины же со штрихом характеризуют это же явление, произошедшие в системе отсчета <math>K'</math>, движущейся со скоростью <math>\vec{u}</math> относительно системы отсчета <math>K</math>; <b>с)</b> <math>c</math> – скорость света по классическим представлениям бесконечна, а в релятивистской механике имеет конечное значение.</p>			
Преобразование Галилея		Преобразование Лоренца	
Прямое преобразование	Обратное преобразование	Прямое преобразование	Обратное преобразование
$x' = x - u t$	$x = x' + u t$	$x' = \frac{x - u t}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$	$x = \frac{x' + u t'}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$
$y' = y$	$y = y'$	$y' = y$	$y' = y$
$z' = z$	$z = z'$	$z' = z$	$z' = z$
$t' = t$	$t = t'$	$t' = \frac{t - \frac{u x}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$	$t = \frac{t' + \frac{u x'}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$

Таблица 5.1 (продолжение)

Результаты, получаемые из преобразования Галилея	Результаты, получаемые из преобразований Лоренца согласно постулатам Эйнштейна
<p>Промежутки времени абсолютны:  <math>\Delta t' = \Delta t</math></p>	<p>Промежутки времени относительны: <i>время в подвижной системе координат замедляется относительно неподвижной системы координат</i>:</p> $\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$ <p>где <math>\Delta t</math> – промежуток времени в неподвижной системе координат, <math>\Delta t_0</math> – собственный промежуток времени, связанный с подвижной системой координат.</p>
<p>Пространственные размеры абсолютны:  <math>\Delta l' = \Delta l</math></p>	<p>Пространственные размеры относительны: <i>линейный размер тела в подвижной системе координат короче, чем в покоящейся системе координат</i>:</p> $l = l_0 \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}$ <p>где <math>l</math> – длина тела в неподвижной системе координат, <math>l_0</math> – длина тела в подвижной системе координат.</p>
<p>Масса инвариантна: <i>выполняется во всех системах отсчета: <math>m' = m</math>.</i></p>	<p>Масса инвариантна: <i>во всех системах отсчета выполняется равенства: <math>m' = m</math>.</i></p>
<p>Правило сложения скоростей по Галилею <math>\vec{v} = \vec{v}' + \vec{u}</math>. Взаимодействие передается не с конечной скорости <math>c</math>, а мгновенно. При переходе из одной системы координат в другую значение скорости может увеличиваться до бесконечности:  <math>\vec{v} = \vec{v}' + \vec{u}, c = v' = \infty,</math>  <math>v = \infty + u = \infty.</math></p>	<p>Скорость света в вакууме одинакова в любом направлении во всех инерциальных системах отсчета:</p> $v = \frac{v' + u}{1 + \frac{v'u}{c^2}} = c, \text{ принять } v' = c, \text{ то } v_x = c.$

**Общая теория относительности (ОТО).** С целью устранения недостатков специальной теории относительности и объяснения “теории гравитации” с релятивистской точки зрения, А.Эйнштейн в 1911–1916 годах сформулировал общую теорию относительности. Недостатки СТО следующие:

- эта теория выполняется только для инерциальных систем отсчета. СТО не выполняется в системах, движущихся с ускорением относительно друг друга;
- эта теория может использоваться только в плоскости прямолинейных координат, в других системах координат ее использование невозможно.

ОТО состоит из двух основных принципов:

*I принцип – принцип эквивалентности или слабый принцип эквивалентности: на основании этого принципа инерциальная масса эквивалентна гравитационной массе, то есть они равны друг другу.* В классической механике используются два понятия “массы”: *инертная масса*, находящаяся в соотношении с ускорением, на основе II закона Ньютона и являющаяся источником гравитационного поля – *гравитационная масса*. Эйнштейн физическими экспериментами доказал, что обе эти массы одинаковы.

*II принцип – сильный принцип эквивалентности: по этому принципу в системе, падающей с ускорением, равным ускорению свободного падения, все законы физики выполняются как бы в отсутствие гравитации, то есть в этой системе невозможно различить эффект притяжения и ускоренное движение.*

Главные результаты, получаемые из этих принципов:

1. *Нарушение закона прямолинейного распространения света и искривление луча света под действием гравитационного поля Солнца: пространственно-временные координаты подвергаются искривлению.* Этот эффект нашел свое подтверждение в результате проведенных наблюдений во время затмения Солнца в 1919 году.
2. *Замедление времени в гравитационном поле – возникновение гравитационного “красного” смещения.* Этот эффект был опытно подтвержден в 1960 году в лаборатории Гарвардского университета физиками США Р.Паундом и Г.Рибки.
3. *Излучение гравитационных волн в результате столкновения бинарных (двойных) звездных систем, расширения Вселенной и другие.* Существование гравитационных волн было обнаружено через 100 лет, учеными США, в 2016 году, при наблюдении столкновения “Черных дыр” (потухшие звезды).

### Исследование-2. Применение. Через сколько лет вернется на Землю космический корабль?

**Задача-2.** Стартовавший в 2036 году космический корабль со скоростью  $0,95c$ , совершив межпланетный перелет, вернулся на Землю. По часам на космическом корабле перелет продолжался 20 лет. Сколько лет продолжался космический перелет по часам на Земле?

Дано	Решение
$v = 0,95c$ , $\Delta t_0 = 20$ год $\Delta t = ?$	$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$

#### Обсуждение результатов:

- Сколько лет продлился космический перелет относительно Земли на основании СТО?
- Сколько лет продлился космический перелет относительно Земли по классической теории относительности?

#### Применение в повседневной жизни:

Дорожная полиция собирается выписать штраф водителю автомобиля, проехавшему на красный свет светофора. Водитель на это возражает: “В “Правилах дорожного движения” указано, что при приближении к светофору с большой скоростью автомобиль мгновенно остановить невозможно. Я же двигался с такой скоростью, что не мог отличить цвет света – красный или зеленый”.

- Верно ли говорит водитель: с какой скоростью должен двигаться автомобиль, чтобы водитель не мог отличить цвет света на светофоре?

#### Провести самооценку:

1. Какие понятия повторили на уроке? Что из этого вы хорошо поняли, а что осталось вам не ясным?
2. Чем отличается специальная теория относительности Эйнштейна от принципов относительности Галилея?
3. Какие постулаты лежат в основе СТО?
4. Какие результаты получаются из постулатов СТО?
5. Какова причина возникновения общей теории относительности?
6. Какие главные результаты выводятся из общей теории относительности?

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Запишите в рабочем листке определения нижеприведенных понятий: “Пространство, время и движение в классическом представлении...”, “Принцип относительности Галилея”, “Первый постулат СТО ...”, “Второй постулат СТО ...”, “релятивистская механика”, “общая теория относительности”, “главные принципы общей теории относительности ...”.

## 5.2

## ЗАКОН ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ ЭНЕРГИЕЙ И МАССОЙ

Камень массой 30 кг поднят на высоту 2 м.

- Как в это время изменились масса и энергия камня?

Согласно теории относительности Эйнштейна, в камне массой 30 кг локализовано (сосредоточено) огромное количество энергии -  $27 \cdot 10^{17}$  Дж.

- Как это возможно?

### Исследование-1. Повторение – мать учения!

**Задача 1.** При изменении массы системы частиц на 1 а.е.м. ( $\Delta m = 1 \text{ а.е.м.} = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ ), энергия этой системы изменяется на 931,5 МэВ. Как изменится энергия системы при изменении ее массы на 4 а.е.м.?

#### Обсуждение результатов:

- Как определяется изменение энергии системы частиц, связанное с изменением массы этой системы (см.: физика-9, стр. 191–192)? Какова связь между массой и энергией?

**Взаимосвязь между массой и энергией.** В классической механике имеются два вида материи: вещество и физическое поле. Главное свойство вещества – его масса, а главное свойство физического поля – наличие у него энергии.

Согласно теории относительности между массой и энергией существует взаимосвязь, то есть если вещество обладает массой, то оно обладает и энергией. В 1905 году А.Эйнштейн сформулировал закон взаимосвязи массы и энергии:

- Любое тело обладает *энергией покоя*, эта энергия равна произведению массы тела на квадрат скорости света в вакууме:

$$E_0 = mc^2. \quad (5.1)$$

- *Энергия покоя* ( $E_0$ ) – это энергия тела, находящегося в состоянии покоя относительно выбранной системы отсчета. Из выражения (5.1) видно, что макроскопическая масса является важной характеристикой энергии. Например, на основании соотношения (5.1) с легкостью можно вычислить, что тело массой 1 гр эквивалентно энергии покоя  $9 \cdot 10^{13}$  Дж:

$$E_0 = 10^{-3} \text{ кг} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \text{ м}^2/\text{с}^2 = 9 \cdot 10^{13} \text{ Дж}.$$

Такая энергия возникает в процессе взрыва атомной бомбы (см.: физика-9, стр.191) и этой энергии достаточно, чтобы превратить 30 000 тонн воды в пар.

Электромагнитное излучение системы, например, световое излучение, это процесс превращения внутренней энергии системы в энергию излучения. В этом процессе масса системы также уменьшается эквивалентно уменьшению внутренней энергии:

$$\Delta m = \frac{E_{\text{излучения}}}{c^2}.$$

Изменение массы эквивалентно изменению энергии:

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}. \quad (5.2)$$



Непрерывное излучение Солнца и других звезд означает, что они подвергаются непрерывной потере энергии и массы. Из проведенных вычислений было определено, что за каждую секунду в результате излучения масса Солнца уменьшается на 4 000 000 тонн.

**Энергия в релятивистской механике (или полная энергия).** Согласно теории относительности полная энергия системы равна сумме его энергии покоя и кинетической энергии:

$$E = E_0 + E_k = mc^2 + E_k. \quad (5.3)$$

Эйнштейн определил, что полная энергия частицы, движущейся со скоростью  $v \leq c$  и не взаимодействующей с другими частицами, при переходе из одной инерциальной системы отсчета в другую, подвергается релятивистскому преобразованию:

$$E = m \frac{c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (5.4)$$

Если тело находится в состоянии покоя:  $v = 0$ , то из выражения (5.4) получается, что оно обладает энергией покоя  $E_0 = mc^2$ .

**Кинетическая энергия в релятивистской механике.** Кинетическая энергия тела равна разности его полной энергии и энергии покоя:

$$E_k = E - E_0 = E - mc^2. \quad (5.5)$$

Если в этом выражении вместо полной энергии запишем выражение (5.4), то получим:

$$E_k = mc^2 \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right). \quad (5.6)$$

**Импульс в релятивистской механике.** Согласно теории относительности импульс системы при переходе из одной инерциальной системы отсчета в другую подвергается релятивистскому преобразованию:

$$\vec{p} = m \frac{\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (5.7)$$

**Связь между полной энергией и импульсом.** Между полной энергией и импульсом в релятивистской механике существует нижеприведенная связь:

$$E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2, \quad (5.8)$$

или

$$E^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4. \quad (5.9)$$

Это соотношение выполняется во всех инерциальных системах отсчета. При переходе из одной инерциальной системы отсчета в другую полная энергия и импульс изменяются, однако их разность не меняется. Если масса будет равна нулю ( $m = 0$ ), то из выражения (5.9) получается:

$$E^2 = p^2 c^2 \rightarrow E = pc. \quad (5.10)$$

Приняв во внимание формулы (5.4) и (5.7) в последнем выражении, получим соотношение между полной энергией и импульсом частицы:

$$\frac{E}{c^2} = \frac{p}{v}. \quad (5.11)$$

Из этого выражения видно, что если  $m = 0$ , то частица движется со скоростью света (например, фотон):  $v = c$ .

## Исследование-2. Применение. “Какая энергия больше?”

**Задача 2.** Определите энергию покоя, “сосредоточенную” в учебнике “Физика” массой 300 гр и сравните ее с энергией  $14 \cdot 10^8$  кВт·час, вырабатываемой Минячевирской электростанцией за год.

### Обсуждение результатов:

- Какая энергия больше: энергия покоя учебника “Физика” или энергия, вырабатываемая Минячевирской электростанцией за год?

**Применение в повседневной жизни:**

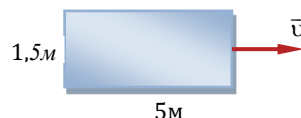
- В каких областях науки и производства связь между массой и энергией играет важную роль?

**Провести самооценку:**

1. Какие понятия повторили на уроке? Что из этого вы хорошо поняли, а что осталось вам не ясным?
2. Что характеризует, согласно классическим представлениям, понятие “масса”?
3. Какой смысл имеет понятие “масса” в релятивистской механике?
4. Что такое энергия покоя?
5. Почему излучение Солнца сопровождается большим количеством потери его массы? На основании какой формулы это можно доказать?
6. Чем отличается релятивистская энергия от полной энергии в классической механике?

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Запишите в рабочем листке определения нижеприведенных понятий: “понятие массы в теории относительности ...”, “энергия покоя”, “эквивалентность массы с энергией ...”, “релятивистская полная энергия ...”, “релятивистская кинетическая энергия ...”, “релятивистский импульс ...”.

- 5.1. Сколько времени пройдет на космическом корабле, движущемся со скоростью  $v = 0,81 c$  относительно Земли, если на Земле пройдет 50 лет?
- 5.2. С какой скоростью должен двигаться космический корабль относительно Земли, чтобы часы на его борту запаздывали в 2,5 раза относительно часов на Земле?
- 5.3. Международный союз астрономов включил 16-летнюю победительницу олимпиады по физике Назрин в команду астрономов. Когда команда после 5-летнего, по часам на борту космического корабля, межпланетного перелета со скоростью  $0,98 \cdot c$  вернулась на Землю, Назрин исполнился 21 год. В каком возрасте будут сверстники из ее класса, оставшиеся на Земле?
- 5.4. Чему равна длина 3-метровой линейки, движущейся со скоростью  $0,9 \cdot c$  в системе отсчета, связанной с Землей?
- 5.5. Как изменятся размеры прямоугольника, движущегося со скоростью  $0,8 \cdot c$  относительно неподвижного наблюдателя?
- 5.6. Энергия покоя электрона равна  $8,1 \cdot 10^{-16}$  Дж. Чему равна его масса?
- 5.7. Протон массой  $1,7 \cdot 10^{-27}$  кг движется со скоростью  $0,8 \cdot c$ . Чему равна его релятивистская кинетическая энергия?
- 5.8. Протон массой  $1,7 \cdot 10^{-27}$  кг движется со скоростью  $0,8 \cdot c$ . Чему равна его полная энергия?
- 5.9. Полярная звезда излучает в окружающее пространство  $5,4 \cdot 10^{28}$  Дж энергии в секунду. На сколько уменьшается масса звезды за секунду?
- 5.10. Электрон со скоростью  $0,4 c$  относительно Земли движется навстречу фотону, имеющему скорость  $c$ . Чему равна скорость фотона относительно электрона?



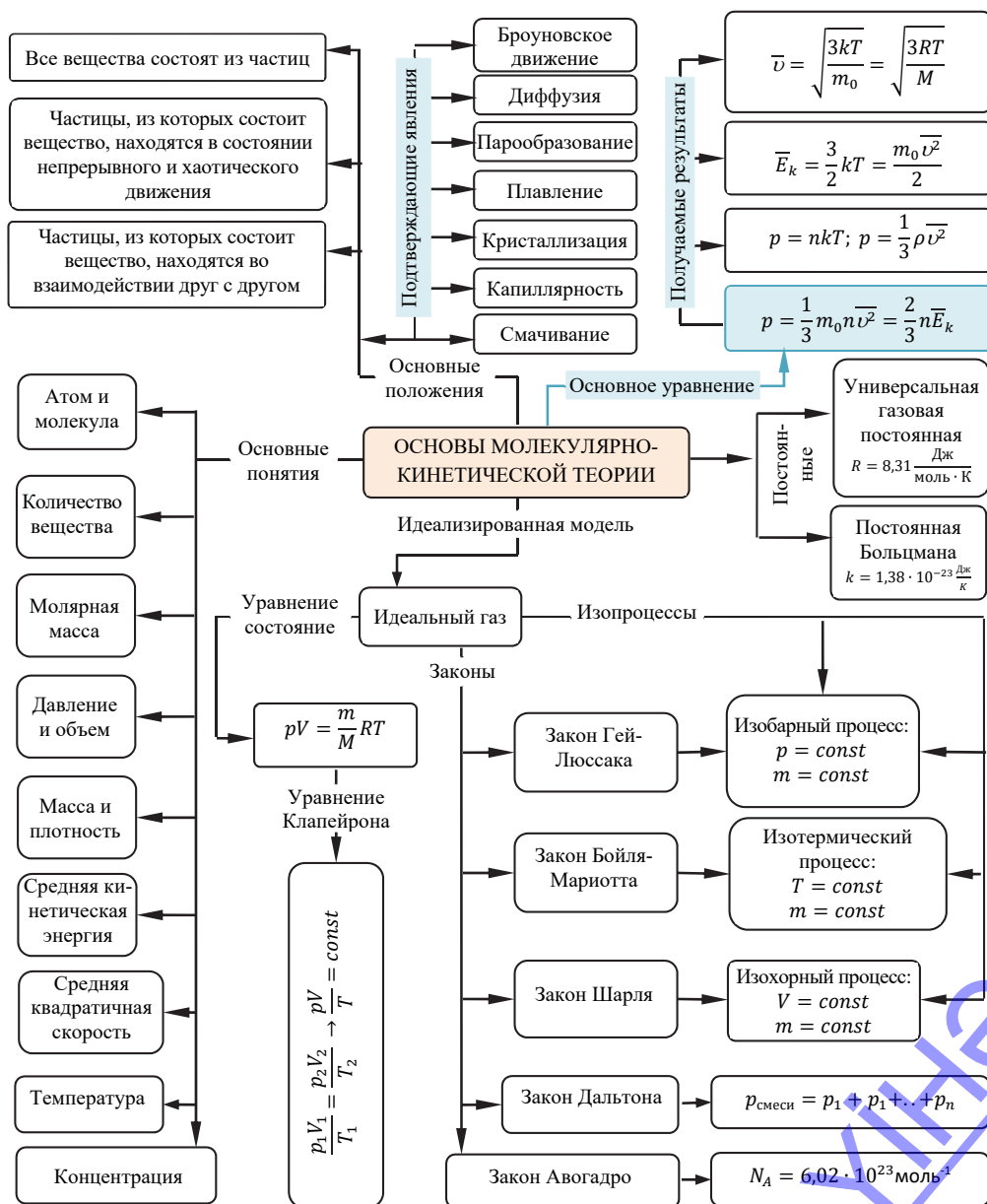
# МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ

Освоив материалы этой главы –  
**ВЫ СУМЕЕТЕ:**

- комментировать основные положения молекулярно-кинетической теории и получаемые из них результаты;
- написать основное уравнение МКТ и получаемые из него результаты в виде формул;
- объяснить понятие идеального газа, уравнение состояния и законы идеального газа;
- исследовать изопроцессы и строить их графики;
- комментировать роль химической связи в формировании свойств твердого тела, различать кристаллические и аморфные тела;
- объяснить процесс парообразования с точки зрения МКТ, различать насыщенный и ненасыщенный пары;
- объяснить свойства жидкостей с точки зрения МКТ, проводить опыты по явлениям поверхностного натяжения, смачивания и капиллярности жидкостей;
- составлять и решать задачи разного характера с применением основного уравнения МКТ, уравнения состояния идеального газа и законов идеального газа.

LAYINƏ

## “Карта понятий” для VI главы



## 6.1

## Молекулярно-кинетическая теория и ее основные положения

Вы, наверно, не раз наблюдали движение взвешенных в воздухе пылинок в солнечных лучах, проникающих в комнату через окно.

- Почему пылинки длительное время остаются в подвешенном состоянии в воздухе, а не падают под действием притяжения Земли?

Известно, что вдыхаемый нами воздух состоит из газов разной плотности – азота ( $N_2$ ), кислорода ( $O_2$ ), углекислого газа ( $CO_2$ ) и других. Эти газы должны были бы расположиться слоями последовательно друг над другом, в соответствии с их плотностями и силой тяжести, действующей на них: сначала, как самый плотный, у поверхности Земли углекислый газ ( $CO_2$ ), над ним кислород –  $O_2$  и выше азот –  $N_2$ . Однако этого не происходит – нас окружает однородный газ.

- Что является причиной превращения в однородную смесь разных газов в атмосфере Земли?



### Исследование-1. Почему тела “слиплись” друг с другом?

#### I опыт

**Оборудование:** свинцовые цилиндры с крючками (2 шт.), набор грузов, штатив с муфтой и лапкой.

**Ход исследования.** 1. Прижав свежестопрополированными поверхностями два свинцовых цилиндра, добейтесь их прилипания друг к другу. Подвесьте цилиндры на штативе. 2. Подвешивайте к нижнему крючку цилиндра грузы до их отрыва друг от друга. Цилиндры выдерживают, не отрываясь, несколько килограммов груза (а).

**Обсуждение результатов:** • К каким выводам приводит исследование?

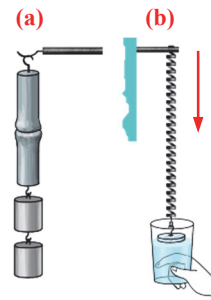
#### II опыт

**Оборудование:** стеклянная пластинка с крючком, прикрепленным к ее поверхности, пружина, стакан с водой, штатив с муфтой и стержнем.

**Ход исследования:** 1. Подвесьте пружину на штативе, прикрепив к нижнему концу стеклянную пластину с крючком. 2. Приблизьте стеклянную пластину к воде в стакане так, чтобы нижняя поверхность пластины коснулась воды. Постарайтесь, двигая стакан с водой вниз, оторвать пластинку от поверхности воды (б).

**Обсуждение результатов:**

- Какие интересные явления наблюдаются в опыте?
- Как можно объяснить причину прилипания пластинки к поверхности воды?



**Молекулярно-кинетическая теория (МКТ).** Мы сами и окружающий нас мир являемся системой *макроскопических тел*.

- **Макроскопическое тело** – это тело, состоящее из большого числа атомов и молекул.

Примером макроскопических тел могут быть песчинка, вода в сосуде, газ в баллоне, железный стержень, Луна, Солнце и другие. В механике макроскопическое тело рассматривается как объект, обладающий определенной массой, пространственными размерами, энергией, изучается положение этого тела в пространстве и взаимодействие его с другими телами. Однако механика не может объяснить внутреннее строение макроскопических тел, взаимодействие между атомами и молекулами, из которых они состоят, и ряд свойств вещества (тепловое расширение, нагревание,

охлаждение, парообразование, конденсацию, плавление, затвердевание, диффузию, конвекцию и др.). В физике выделен раздел – *молекулярная физика*, в котором собраны результаты изучения внутреннего строения вещества.

- **Молекулярная физика** – это раздел физики, в котором изучаются внутреннее строение макроскопических тел, их свойства и основные закономерности теплового движения материи.

- **Молекулярно-кинетическая теория (МКТ)** – теория, объясняющая свойства макроскопических тел и тепловые процессы в этих телах на основе представлений о веществе как о системе атомов и молекул, непрерывно и хаотически движущихся и взаимодействующих друг с другом.

**Основные положения молекулярно-кинетической теории.** В основе МКТ лежат три положения:

**I положение:** все вещества состоят из частичек – атомов и молекул. Существование атомов и молекул было предсказано еще древними философами. Однако ясную количественную теорию этого факта впервые предложил английский ученый-химик Джон Далтон (1766–1844). Составив таблицу относительных атомных масс ряда элементов, он заложил основу теории атомного строения вещества. В наше время, используя способность электронного микроскопа увеличивать в миллионы раз размеры объекта, можно увидеть и сфотографировать достаточно большие молекулы.

**II положение:** частицы, из которых состоит вещество, находятся в непрерывного и беспорядочного (хаотического) движения.

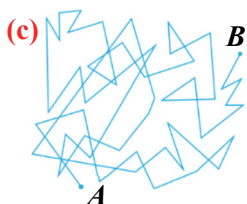
Верность этого положения была установлена на основе открытия, сделанного в 1827 году английским ботаником Робертом Броуном, наблюдавшим в микроскоп за движением цветочной пыльцы в воде. Он обнаружил, что пыльца совершает хаотическое движение и изменяет свое положение по сложной траектории (с). Беспорядочное движение частиц, называемое “броуновским движением”, теоретически было объяснено А.Эйнштейном в 1905 году, а опытным путем было подтверждено в 1909–1911 годах французским физиком Яном Батистом Перреном (1870–1942). Он подтвердил предположение Эйнштейна, что причиной хаотического движения частичек краски в воде является тепловое движение молекул воды. Перрен определил, что интенсивность броуновского движения частиц зависит не от их химической природы, а от температуры: с увеличением температуры интенсивность броуновского движения также увеличивается. Таким образом:

- **Броуновским движением** называется беспорядочное движение частиц, взвешенных в жидкости (или газе).

Другим явлением, подтверждающим второе положение МКТ, является *диффузия*.

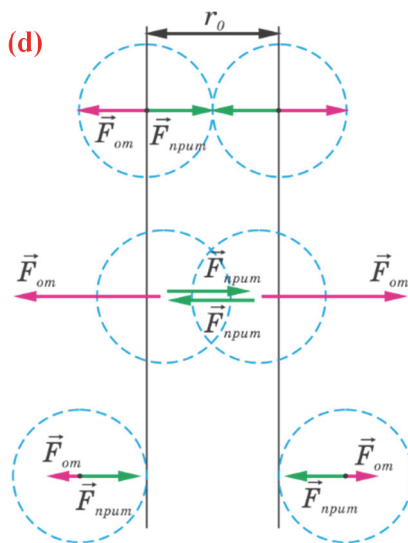
- **Диффузией** называется процесс самопроизвольного взаимного проникновения атомов или молекул одного вещества в межатомные или межмолекулярные промежутки другого вещества.

Первое количественное описание процесса диффузии дал в 1855 году немецкий физик и физиолог Адольф Фик (1829–1901) в законе, названном “законом диффузии Фика”.



**III положение:** частицы вещества взаимодействуют друг с другом, то есть между ними существуют силы взаимного притяжения и отталкивания.

Подтверждением этого положения является возникновение силы упругости во время деформации тела. Эти силы имеют характер близкого действия, электромагнитную природу и в значительной степени зависят от расстояния между частицами. Например, было определено, что силы притяжения между молекулами уменьшаются по закону  $\frac{1}{r^7}$ , а силы отталкивания между ними уменьшаются по закону  $\frac{1}{r^9}$ . Равнодействующая этих сил на расстояниях, в 2–3 раза больших диаметра молекулы [ $r \geq (4 \div 6) r_0$ ] и на расстоянии, равном диаметру молекулы ( $r = r_0$ ), можно сказать, равна нулю (d).



**Характеристика атомов и молекул.** Вам известны характеристики атомов и молекул (см.: химия-8): их линейные размеры, относительная масса, их число в единице объема, количество вещества и другие количественные характеристики (см.: таблица 6.1).

Таблица 6.1

Характеристика частицы	Выражается
Атомная единица массы (а.е.м.)	Атомная единица массы (а.е.м.) – это единица измерения массы в атомной и ядерной физике, равна $1/12$ массы изотопа $^{12}_6\text{C}$ : $1 \text{ а. е. м.} = \frac{1}{12} m_{0,\text{C}} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ $m_{0,\text{C}}$ – масса атома углерода.
Относительная молекулярная масса вещества	Относительной молекулярной (атомной) массой вещества называется отношение массы молекулы (атома) вещества $m_0$ к $1/12$ массы атома углерода: $M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_{0,\text{C}}}$ $M_r$ – относительная молекулярная масса, $m_0$ – масса молекулы (атома) вещества, $m_{0,\text{C}}$ – масса атома углерода. Относительная молекулярная масса не имеет размерности.
Число Авогадро	Число Авогадро – это постоянная величина, равная числу молекул (или атомов) в одном моле любого вещества: $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ .
Количество вещества	Количество вещества ( $\nu$ ) – это отношение числа молекул или атомов данного вещества, $k$ числу Авогадро $N_A$ : $\nu = \frac{N}{N_A}$ . $N$ – число молекул в данном веществе. Единица количества вещества является основной единицей в СИ: $[\nu] = 1 \text{ моль}$ . 1 моль – это количество вещества, в котором содержится столько же молекул или атомов, сколько их в $0,012 \text{ кг}$ углерода.
Молярная масса	Молярной массой называется масса одного моля вещества: $M = m_0 \cdot N_A$



	<p>Единицей молярной массы в СИ является килограмм на моль (<math>1 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}</math>): <math>[M] = 1 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}</math>.</p> $\begin{cases} \text{Масса одной молекулы вещества: } m_0 = \frac{M}{N_A} \rightarrow N_A = \frac{M}{m_0} \\ \text{Масса любого вещества: } m = m_0 \cdot N \rightarrow N = \frac{m}{m_0} \end{cases}$ <p>Следовательно, количество вещества равно отношению массы вещества к его молярной массе: <math>\nu = \frac{m}{M}</math>.</p>
Число молекул в веществе	Число молекул в любом веществе массой $m$ и молярной массой $M$ определяется формулой: $N = \nu \cdot N_A = \frac{m}{M} \cdot N_A$ .

## Исследование-2. Применение. Модель броуновского движения

**Оборудование:** пластина разборного конденсатора, стеклянный баллон для вакуума, тонкая железная полоска, усилитель, пустотельные шарики из алюминиевой фольги (10-12 штук диаметром 8 мм), теннисный мячик, подвешенный на нити, скотч, подставка штатива.

**Ход исследования:**

1. Подготовьте установку, моделирующую броуновское движение.

**Последовательность шагов в изготовлении установки:**

**I шаг.** Закрепив диэлектрическую ручку пластины конденсатора в подставке штатива, добейтесь, чтобы получился горизонтальный алюминиевый столик. Приклейте скотчем тонкую железную полоску изнутри к стенке стеклянного баллона.

**II шаг.** Присоедините выходы усилителя к алюминиевому столику и железной полосе.

**III шаг.** Приклеив лентой свободный конец нити с теннисным мячиком к вершине стеклянного баллона изнутри, создайте нитевой маятник (маятник должен находиться на высоте 5-6 см от поверхности алюминиевого столика).

**IV шаг.** Закройте стеклянным баллоном рассыпанные по поверхности столика алюминиевые шарики – установка готова (е)!

2. Включив усилитель, создайте в цепи напряжение в 25 кВ. В это время алюминиевые шарики, как в “Спортлото”, начинают беспорядочное движение между железной полосой и алюминиевым столиком. Они наносят удары в разных направлениях как друг другу, так и теннисному мячику на нити. Внимательно проследите за траекторией движения теннисного мячика и схематически представьте эту траекторию на рабочем листке.

**Обсуждение результатов:**

- Что такое броуновское движение? При помощи каких тел в изготовленном устройстве были смоделированы молекулы и броуновские частички? Ответ обосновать.

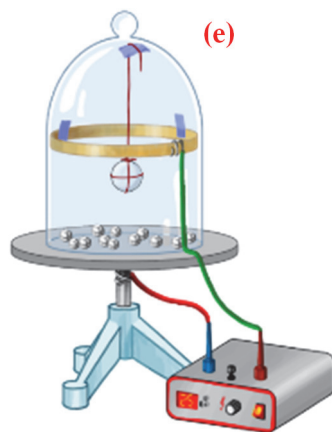
**Применение в повседневной жизни:**

- Для чего необходимо знать основные положения молекулярно-кинетической теории? При ответе на данный вопрос можете использовать нижеприведенные ключевые слова.

**Ключевые слова:** агрегатные состояния веществ в природе; круговорот воды в природе; парообразование и влажность в природе и быту; диффузия в природе и быту.

**Провести самооценку:**

1. Какие понятия повторили на уроке? Что из этого вы хорошо поняли, а что осталось вам не ясным?
2. В чем заключается важность молекулярно-кинетической теории?



3. Сколько атомов водорода имеется в метане ( $CH_4$ ) массой 12 кг  
( $N_A = 6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ ;  $M = 0,016 \text{ кг/моль}$ )?

Дано	Решение
$m = 12 \text{ гр} = 12 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$ $N_A = 6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ $M = 0,016 \text{ кг/моль}$ $N_H = ?$	I шаг: $N_{(CH_4)} = \frac{m}{M} \cdot N_A$ . II шаг: $N_H = 4 \cdot N_{(CH_4)}$ .

4. Каков физический смысл постоянной Авогадро?  
5. Постройте “карту характеристик” молекулы.

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Запишите в рабочем листке определения для следующих понятий: “Макроскопическое тело”, “Молекулярная физика”, “молекулярно-кинетическая теория”, “I положение МКТ”, “II положение МКТ”, “III положение МКТ”, “Атомная единица массы”, “относительная молекулярная масса”, “Количество вещества”, “Молярная масса”.

## 6.2 ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ. ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

В молекулярной физике изучаются свойства вещества во всех агрегатных состояниях, в том числе и газообразном. В природе почти нет отдельно взятого газа, реальный газ атмосферы представляют собой сложную систему разных газов.

Основная задача молекулярно-кинетической теории – установление связи между макроскопическими и микроскопическими параметрами, характеризующими свойства этой сложной системы. С этой целью реальный газ сложного состава заменяется упрощенной, идеализированной моделью.

- **Какими свойствами газа обладает упрощенная модель газа?**
- **Какие свойства газа можно охарактеризовать его макроскопическими и микроскопическими параметрами?**

### Исследование-1. Моделирование давления молекул газа

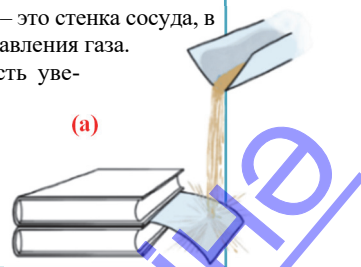
**Оборудование:** сухой морской песок (0,5 кг), картонный лист (2 шт.), учебник (2 шт.), мобильный телефон.

**Ход исследования:**

1. Расположите, как показано на рисунке, картонный лист между двумя учебниками.
2. Равномерно сыпьте крупинки песка на поверхность горизонтального листа и сфотографируйте мобильным телефоном наблюдаемое явление (а).
3. Представьте, что крупинки песка – это молекулы газа, а картонный лист – это стенка сосуда, в котором находится газ, и подумайте, как объяснить физический смысл давления газа.
4. Повторите опыт, увеличивая высоту падения крупинок песка, то есть увеличивая их скорость. Проследите за произошедшим явлением.

### Обсуждение результатов:

- К какому выводу вы пришли в исследовании: в чем физический смысл давления газа, как это давление создается?
- Как изменяется давление газа с увеличением скорости “молекул газа”?



**Идеальный газ.** Первый шаг в создании любой физической теории состоит в построении идеализированной модели реального объекта. Такая модель всегда имеет упрощенный вид действительности, и с ее помощью изучаются

количественные и качественные закономерности и свойства реального объекта с учетом определенных ограничений.

Для изучения свойств газов в молекулярно-кинетической теории применяется идеализированная модель – “идеальный газ”.

• **Идеальный газ** – это газ, удовлетворяющий следующим условиям:

– линейные размеры молекул во много раз меньше расстояний между ними и не принимаются во внимание. Поэтому можно сказать, что молекулы идеального газа не взаимодействуют друг с другом, то есть потенциальная энергия взаимодействия молекул идеального газа равна нулю:

$$E_p = 0.$$

Поэтому идеальный газ можно сколько угодно сжимать;

– только при соударении молекул друг с другом или со стенками сосуда между ними возникают силы отталкивания;

– соударения молекул абсолютно упругие;

– скорость молекул может иметь произвольные значения, движение каждой молекулы подчиняется законам классической механики.

Свойства идеального газа характеризуются микроскопическими и макроскопическими параметрами и связями между ними.

• **Микроскопические параметры газа** – это параметры, характеризующие движение молекул газа. К ним относятся масса молекулы, его скорость, импульс и кинетическая энергия поступательного движения молекулы.

• Макроскопическими являются такие параметры газа, как его давление, объем и температура, определяющие свойства газа в целом.

Основной задачей молекулярно-кинетической теории является установление взаимной связи между микроскопическими параметрами, характеризующими молекулы газа, и макроскопическими (измеряемыми) величинами, характеризующими газ.

**Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа.** Известно, что давление газа возникает в результате многочисленных непрерывных и беспорядочных соударений молекул газа о стенки сосуда, в котором он находится. Это давление равно среднему значению модуля равнодействующей силы, приходящейся на единицу площади:

$$p = \frac{\bar{F}}{S}.$$

В 1857 г. немецкий физик Рудольф Клаузиус (1822–1888), используя модель идеального газа, определил уравнение для давления газа, называемое *основным уравнением молекулярно-кинетической теории идеального газа*.

• **Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа** – это уравнение, связывающее макроскопический параметр газа – его давление, с микроскопическими параметрами, характеризующими молекулы газа:

$$p = \frac{1}{3} m_0 n \overline{v^2}. \quad (6.1)$$

Где  $\frac{1}{3}$  – количественный коэффициент, характеризующий трехмерность пространства и выражающий равноправность всех трех направлений в хаотическом

движении молекул,  $m_0$  – масса одной молекулы,  $n$  – концентрация молекул,  $\bar{v}$  – средняя квадратичная скорость молекул.

- Концентрация молекул – это число молекул в единице объема:

$$n = \frac{N}{V}. \quad (6.2)$$

Единица концентрации в СИ:  $[n] = \frac{1}{\text{м}^3} = \text{м}^{-3}$ .

- Средняя квадратичная скорость молекул равна корню квадратному из средней арифметической величины квадратов скоростей отдельных молекул:

$$v_{\text{ср.кв.}} = \sqrt{\bar{v^2}} = \sqrt{\frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2}{N}}.$$

Так как среднее значение квадрата скорости молекул связано со средним значением кинетической энергии их поступательного движения, то, следовательно, и давление идеального газа зависит от среднего значения кинетической энергии молекул:

$$\bar{E}_k = \frac{m_0 \bar{v^2}}{2}, \quad (6.3)$$

$$p = \frac{2}{3} n \bar{E}_k. \quad (6.4)$$

- Давление идеального газа прямо пропорционально концентрации молекул и среднему значению кинетической энергии молекул.

Если принять во внимание, что плотность газа  $\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_0 N}{V} = m_0 n$  в (6.1), то получится формула зависимости давления идеального газа от ее плотности:

$$p = \frac{1}{3} \rho \bar{v^2}. \quad (6.5)$$

#### Исследование-1. Применение. Определите среднюю кинетическую энергию атомов газа.

**Задача.** Видимая атмосфера Солнца (фотосфера), можно сказать, состоит из водородного газа. Концентрация атомов в водородном газе фотосферы приблизительно равна  $n = 1,6 \cdot 10^{21} \text{м}^{-3}$ , давление же равно  $p = 1,25 \cdot 10^2 \text{Па}$ . Чему будет равна средняя кинетическая энергия поступательного движения атомов водородного газа фотосферы, если принять его за идеальный газ?

#### Обсуждение результатов:

- Какова связь между средней кинетической энергией поступательного движения молекул (атомов) идеального газа и его давлением?

**Применение в повседневной жизни:** Предположим, что окружающий нас воздух состоит из одинаковых молекул. С какой средней квадратичной скоростью эти молекулы, при нормальных условиях, наносят нам удары? При нормальных условиях давление воздуха равно  $10^5 \text{Па}$ , а плотность –  $1,29 \text{кг/м}^3$ .

**Провести самооценку:** 1. Какие понятия повторили на уроке? Что из этого вы хорошо поняли, а что осталось вам не ясным? 2. Как объясняется давление газа в МКТ? 3. При каких условиях газ можно назвать идеальным? 4. Что характеризуют микроскопические и макроскопические параметры газа? 5. Почему формула давления идеального газа называется основным уравнением МКТ? 6. Постройте карту понятия “Идеальный газ”.

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Запишите в рабочем листке определения для следующих понятий: “идеальный газ”, “микроскопические параметры газа”, “макроскопические параметры газа”, “основное уравнение МКТ идеального газа”, “концентрация молекул”, “средняя квадратичная скорость молекул”, “давление идеального газа”.

### 6.3 ТЕПЛОВОЕ РАВНОВЕСИЕ. ТЕМПЕРАТУРА

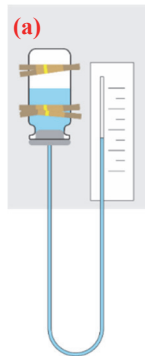
Понятие температуры занимает важное место в повседневной жизни. Так, говоря температура, мы обычно подразумеваем степень нагретости (горячее, теплое, холодное) тела. Такое рассмотрение в достаточной степени субъективно, потому что температура зависит не только от состояния рассматриваемого тела, но и от нашей чувствительности.

- Как можно избежать субъективности в определении температуры?
- Почему для определения температуры нашего тела ртутный (или спиртовый) термометр выдерживается под мышкой 5-10 минут?

#### Исследование-1. Изготовление водяного термометра

**Оборудование:** стеклянный сосуд (флакон), тонкая прозрачная трубка (можно взять пустой стержень шариковой ручки), подкрашенная вода (4-5 мл), пластилин, клейкая лента, лист бумаги, лист картона (6 × 6 см), нить, лед, спиртовый термометр, стакан, электронагреватель, вода (0,5 л), карандаш.

**Ход исследования:** 1. Наполнив наполовину сосуд подкрашенной водой, закройте его пробкой. 2. Пропустив один конец трубки через отверстие в пробке, подсоедините её к ампуле. Залепите пластилином возможную щель между трубкой и пробкой. 3. Согнув трубку в U-образную форму, закрепите ее открытый конец на листе бумаги, это будет “шкала” термометра. Закрепите нитью лист бумаги на картоне. Водяной термометр готов (а). 4. Проградуировьте термометр. Для этого, нагрев воду, например, до 50°C, налейте ее в стакан. Опустив спиртовый и водяной термометры в стакан с водой, подождите несколько минут. Отметьте штрихом уровень воды в трубке водяного термометра и напишите перед штрихом число, соответствующее показанию спиртового термометра, например, 45°C. 5. Продолжайте градуировку шкалы термометра по мере остывания воды в стакане.



#### Обсуждение результатов:

1. Что является причиной неизменности показаний термометра в течение длительного времени?
2. В каком температурном интервале можно измерять температуру водяным термометром? Почему?
3. Объяснить с точки зрения МКТ: почему при нагревании вещества его температура увеличивается, а при охлаждении, наоборот, уменьшается?

**Тепловое равновесие.** Известно, что при соприкосновении двух тел с разными температурами между ними происходит теплообмен: тепло переходит от тела с высокой температурой к телу с более низкой температурой. Этот процесс продолжается до тех пор, пока температуры обоих тел не сравняются. Этот факт учитывается при измерении температуры тел – термометр приводится в соприкосновение с телом, но его показания снимаются не сразу, а через определенный промежуток времени, в течение которого между телом и термометром устанавливается *тепловое*, или так называемое *термодинамическое равновесие*. При термодинамическом равновесии макроскопические параметры системы остаются постоянными, то есть изменение агрегатного состояния вещества не происходит.

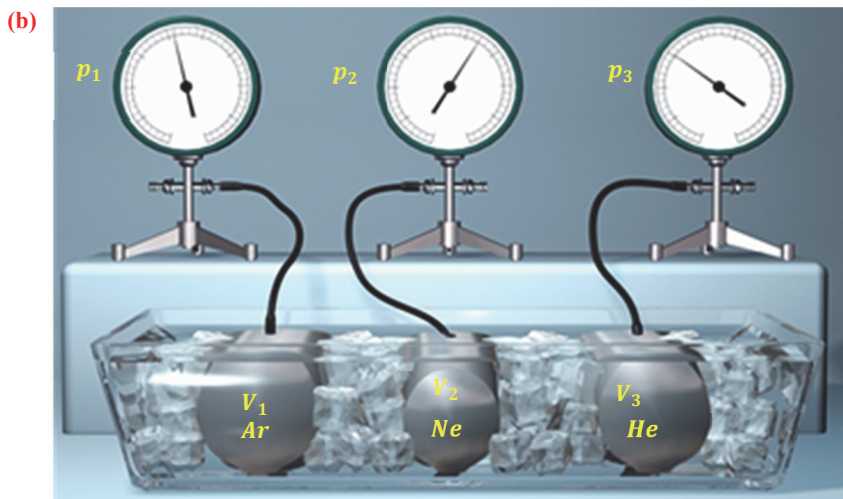
• **Тепловое или термодинамическое равновесие** – это состояние системы, когда ее макроскопические параметры длительное время остаются неизменными.

Состояние теплового равновесия системы характеризуется температурой.

• **Температура** – физическая величина, характеризующая состояние теплового равновесия макроскопической системы: в состоянии теплового равновесия температура всех частей системы одинакова.

Качественное и количественное определение температуры должно основываться на определении физической величины, которая, во-первых, должна характеризовать состояние тела, во-вторых, должна быть одинакова для всех тел, находящихся в тепловом равновесии. Такой величиной является средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул вещества. Можно легко определить ее значения для поступательно движущихся молекул одноатомного идеального газа.

С этой целью был поставлен следующий интересный эксперимент: три баллона разного объема, снабженные манометрами (прибор для измерения давления), заполнены различными газами, например, аргоном, неоном и гелием. Баллоны помещаются сначала в тающий лед ( $t_0 = 0^\circ\text{C}$ ), а затем в кипящую воду ( $t = 100^\circ\text{C}$ ) (b).



Произведенные вычисления показывают, что в обоих случаях (и при температуре  $0^\circ\text{C}$ , и при температуре  $100^\circ\text{C}$ ) при достижении теплового равновесия, отношение  $\frac{pV}{N}$  во всех баллонах остается постоянным, несмотря на то, что давление и концентрация газов разная:

$$\text{при } t = 0^\circ\text{C} \rightarrow \frac{p_1 V_1}{N_1} = \frac{p_2 V_2}{N_2} = \frac{p_3 V_3}{N_3} = 3,76 \cdot 10^{-21} \text{ Н} \cdot \text{м} = 3,76 \cdot 10^{-21} \text{ Дж},$$

$$\text{при } t = 100^\circ\text{C} \rightarrow \frac{p_1 V_1}{N_1} = \frac{p_2 V_2}{N_2} = \frac{p_3 V_3}{N_3} = 5,14 \cdot 10^{-21} \text{ Н} \cdot \text{м} = 5,14 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}.$$

Если принять во внимание, что  $\frac{V}{N} = \frac{1}{n}$ , то получается, что при тепловом равновесии отношение давления газа к его концентрации равно постоянной величине, измеряемой в единицах энергии – джоулях:

$$\frac{p}{n} = \theta. \quad (6.6)$$



Здесь  $\theta$  (тета) — является постоянной величиной, зависящей для всех разреженных газов, приближенных к идеальному газу, только от температуры:

$$\theta = kT. \quad (6.7)$$

$T$  — абсолютная температура,  $k$  — является коэффициентом пропорциональности и называется *постоянной Больцмана*, в честь австрийского физика Людвига Больцмана (1844–1906). Опытным путем было определено, что постоянная Больцмана равна:

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}. \quad (6.8)$$

Постоянная Больцмана связывает температуру  $\theta$ , измеряемую в единицах энергии, с абсолютной температурой  $T$ , измеряемой в Кельвинах. Из выражений (6.6) и (6.7) получается выражение для давления идеального газа:

$$p = nkT. \quad (6.9)$$

Выражение (6.9) может быть использовано для определения абсолютной температуры в Кельвинах:

$$T = \frac{p}{nk}. \quad (6.10)$$

Формула (6.10) дает возможность создания новой температурной шкалы. Такая температурная шкала, называемая *шкалой абсолютных температур*, была предложена в 1848 году английским физиком Уильямом Томсоном (1824–1907). За вклад в области физики в 1892 году он был награжден титулом *лорда Кельвина*.

Поэтому предложенная им шкала температур называется *шкалой Кельвина*. Нулевая точка шкалы Кельвина, то есть *температура абсолютного нуля*, это самая низкая температура, какая возможна теоретически и практически. Согласно этой шкале температура плавления льда равна  $T_0 = 273,15\text{K}$ . Соотношение между температурной шкалой Цельсия и шкалой Кельвина следующая:

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

При вычислениях это соотношение можно записать в более простой форме:

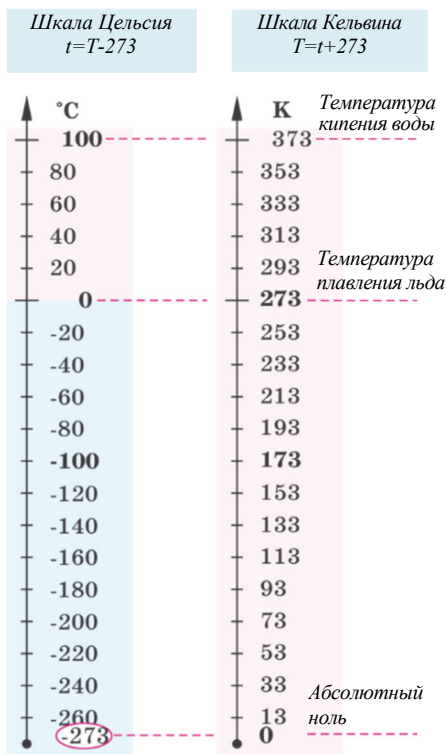
$$T = t + 273. \quad (6.11)$$

Единица измерения абсолютной температуры, являющейся основной в СИ — Кельвин (1K):  $[T] = 1\text{K}$ . Эта температура соответствует температуре  $1^\circ\text{C}$  по шкале Цельсия. Поэтому, разность температур и по шкале Кельвина, и по шкале Цельсия одинакова:

$$\Delta T = \Delta t \text{ (с)}.$$

**Температура — мера средней кинетической энергии молекул.** На самом

(с)





деле из сравнения выражений (6.4) и (6.9) получаем, что абсолютная температура, являющаяся макроскопическим параметром идеального газа (или разреженного газа), связана со средней кинетической энергией молекул, являющейся ее микроскопическим параметром:

- Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул газа прямо пропорциональна его абсолютной температуре:

$$\overline{E}_k = \frac{3}{2} kT. \quad (6.12)$$

Из формулы (6.12) ясно виден физический смысл температуры:

*Температура – это мера средней кинетической энергии поступательного движения молекул тела.* Это утверждение так же верно для жидкостей и твердых тел. Из формулы видно, что среднее значение кинетической энергии поступательного движения, а значит, и средняя квадратичная скорость молекул при абсолютном нуле равна нулю.

**Средняя квадратичная скорость молекул.** Из формул (6.1), (6.3) и (6.5) можно вычислить среднюю квадратичную скорость молекул:

$$v_{\text{ср.кв.}} = \sqrt{\frac{2\overline{E}_k}{m_0}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3p}{\rho}}. \quad (6.13)$$

#### Исследование-2. Применение. На сколько увеличится температура?

**Задача.** Температура идеального газа равна 373 К. На сколько увеличится температура идеального газа, если средняя квадратичная скорость его молекул увеличится в 3 раза?

#### Обсуждение результатов:

- Каково соотношение между температурой идеального газа и средней кинетической энергией его молекул?
- На сколько увеличится температура газа, если средняя кинетическая энергия его молекул увеличится в 3 раза?

#### Применение в повседневной жизни:

- Как с помощью обычного термометра можно измерить температуру муравья?

#### Провести самооценку:

1. Какие понятия повторили на уроке? Что из этого вы хорошо поняли, а что осталось вам не ясным?
2. Что характеризуется температурой?
3. Что такое тепловое равновесие? Что можно сказать о температурах тел, находящихся в тепловом равновесии?
4. Каков физический смысл абсолютного нуля?
5. Какой температуре по шкале Кельвина соответствует  $-73^\circ\text{C}$ ? 6. Постройте карту понятий “температура”.

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Запишите в рабочем листке определения для следующих понятий: “тепловое равновесие”, “температура”, “абсолютная температура”, “связь между шкалами температур Кельвина и Цельсия”, “физический смысл температуры”.

Для подготовки презентации по теме “Исследование результатов экспериментального определения скорости движения и взаимодействия молекул”, можно воспользоваться знаниями, навыками и теоретической информацией, полученной на предыдущем уроке.

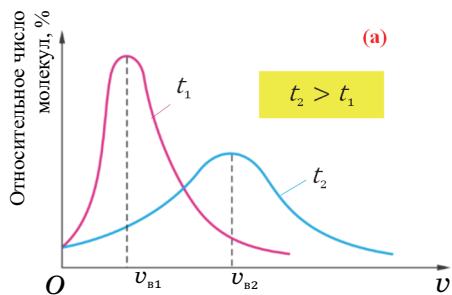
**Определение скорости движения молекул газа.** Молекулы газа находятся в непрерывном хаотичном движении. Удивительно то, что беспорядочное движение огромного числа молекул газа подчиняется определенной закономерности распределения по скоростям. В таблице 6.2 дано распределение по скоростям для молекул азота (при комнатной температуре и в процентах относительно общего количества молекул).

Таблица 6.2.

Скорость, м/с	0 ÷ 100	100 ÷ 300	300 ÷ 500	500 ÷ 700	700 ÷ 900	> 900
Относительное число молекул, %	1	25	42	24	7	1

Из таблицы видно, что 1% от общего числа молекул движется с очень малыми скоростями. Приблизительно половина всех молекул (42%) движется со средними скоростями  $(300 \div 500) \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . 91% общего числа молекул имеют скорости в пределах от  $100 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  до  $700 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

В 1860 году английский физик Джеймс Максвелл (1831–1879), используя теорию вероятности, определил закономерность распределения молекул газа по скоростям и изобразил ее графически (а). Максимум графика соответствует наиболее вероятному значению скорости ( $v_B$ ). То есть наибольшее количество молекул газа при данных значениях температуры и объема движется со скоростями, близкими



к наиболее вероятному значению  $v_B$  (например, для азота при температуре  $20^\circ\text{C}$   $v_B = 415 \text{ м/с}$ ). С увеличением температуры растет число молекул, движущихся с большими скоростями, и уменьшается число молекул, обладающих малыми скоростями. В результате увеличивается значение  $v_B$  и наблюдается смещение максимума кривой “распределения” в сторону больших скоростей (см.: а).

Первые экспериментальные исследования по измерению скоростей молекул газа провел в 1920 году немецкий ученый Отто Штерн (1888–1969). Вычисленные им значения для скоростей молекул совпали со значениями, определенными на основе МКТ. Научное значение опытов Штерна состоит в том, что скорость молекул газа была определена экспериментально, и в том, что эти опыты подтвердили теоретически установленную закономерность распределения молекул газа по скоростям.

## Примерный план подготовки презентации

I слайд	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Название презентации</li> <li>• Подготовил</li> </ul>
II слайд	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Макро- и микропараметры, от которых зависит скорость движения молекул идеального газа</li> </ul>
III слайд	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Определение закономерности распределения движения молекул газа по скоростям на основании анализа таблицы 6.2</li> </ul>
IV слайд	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Анализ графика зависимости относительного числа молекул от скорости</li> </ul>
V слайд	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Результат, получаемый из опыта Штерна</li> </ul>

## 6.5 УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Вы исследовали идеальный газ с позиций МКТ и определили связь между его макро-скопическими и микроскопическими параметрами.

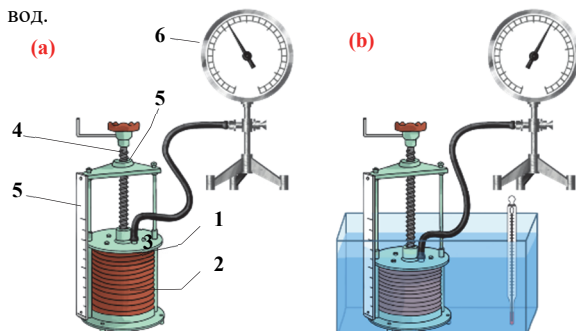
- Какие макроскопические и микроскопические параметры связывает основное уравнение МКТ идеального газа? Как записывается уравнение?
- Можно ли связать в одном выражении три макроскопических параметра, характеризующих состояние идеального газа (давление, объем и температура)? Как это можно сделать?

### Исследование-1. Какая закономерность связывает макроскопические параметры газа данной массы?

**Оборудование:** сиффон, манометр, аквариум, термометр, водонагреватель, вода (2л).

**Устройство сиффона.** Прибор состоит из герметичного металлического гофрированного цилиндра переменного объема – сиффона (2), к которому прикреплена крышка (1). На крышке прибора имеется патрубок (3) для соединения с манометром. С помощью винта (4) изменяется объем цилиндра, в результате этого давление воздуха внутри цилиндра так же изменяется. Объем воздуха, заключенного в цилиндре, измеряется в условных единицах на основании шкалы (5), закрепленной сбоку к прибору, а давление измеряется манометром (6) (а).

**Ход исследования:** 1. Соединив сиффон с манометром, отметьте объем  $V_1$  и давление  $p_1$  воздуха в цилиндре при комнатной температуре ( $T_1$ ). Вычислите на основании полученных значений отношение  $\frac{p_1 V_1}{T_1}$ . 2. Изменив объем сиффона, поместите его в теплую воду. Отметьте параметры нового состояния воздуха –  $T_2, V_2, p_2$  (б). Вычислите на основании полученных значений отношение  $\frac{p_2 V_2}{T_2}$ . 3. Сравните оба отношения, полученные из опытов, и сделайте вывод.



#### Обсуждение результатов:

- Какая закономерность определена после вычисления макроскопических параметров, соответствующих разным состояниям газа (воздуха) данной массы?
- К каким выводам приводит проведенное исследование?

**Уравнение Клапейрона.** Связь между тремя макроскопическими параметрами (давление, объем и температура), характеризующими состояние идеального газа, определяет *уравнение состояния идеального газа*.

• **Уравнение состояния идеального газа** – это уравнение, описывающее состояние газа и устанавливающее связь между параметрами его начального и конечного состояний.

Если число молекул идеального газа остается постоянным, то есть масса и молярная масса не меняются, то при переходе идеального газа из одного состояния в другое, из формул (6.2) и (6.9) имеем для этих состояний:

$$\begin{cases} p_1 V_1 = N k T_1 \\ p_2 V_2 = N k T_2. \end{cases} \quad (6.14)$$

Где  $p_1, V_1, T_1$  – параметры идеального газа в начальном состоянии,  $p_2, V_2, T_2$  – параметры идеального газа в конечном состоянии. При помощи простых математических преобразований выражений (6.14) для идеального газа данной массы ( $m = \text{const}$ ) получим:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad \text{или} \quad \frac{pV}{T} = \text{const}. \quad (6.15)$$

Это уравнение (6.15), характеризующее состояние идеального газа, впервые в 1834 году получил французский физик Бенуа Клапейрон (1799–1864), поэтому его назвали *уравнением Клапейрона*.

• *Отношение произведения давления идеального газа данной массы на его объем к абсолютной температуре является постоянной величиной.*

**Уравнение Менделеева-Клапейрона.** Приняв во внимание формулу, связывающую число частичек вещества, общую массу вещества, молярную массу и число Авогадро,

$$N = \frac{m}{M} N_A$$

в формуле (6.14), получим:

$$pV = k N_A \frac{m}{M} T. \quad (6.16)$$

Произведение постоянной Больцмана на постоянную Авогадро также является постоянной величиной. Оно называется *универсальной газовой постоянной*, обозначается буквой  $R$  и имеет числовое значение:

$$R = k N_A = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \quad (6.17)$$

Приняв во внимание выражение (6.17) в (6.16), получаем выражение, характеризующее состояние идеального газа и называемое *уравнением Менделеева-Клапейрона*:

$$pV = \frac{m}{M} RT = \nu RT. \quad (6.18)$$

Физический смысл универсальной газовой постоянной определяется из последнего выражения:

Универсальная газовая постоянная равна отношению произведения давления и объема к абсолютной температуре одного моля любого газа.

Уравнение Менделеева-Клапейрона можно записать и в таком виде:

$$p = \frac{\rho}{M} RT. \quad (6.19)$$

Где  $\rho = \frac{m}{V}$  – плотность газа.

**Исследование-2. Применение.** Умее ли вы применять уравнение состояния идеального газа?

**Задача -1.** Баллон объемом  $0,1 \text{ м}^3$  заполнен газом массой  $8,9 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$  при температуре  $0^\circ\text{C}$  и давлении  $10^5 \text{ Па}$ . Определите молярную массу газа. Какой это газ?

**Задача-2.** Метеорологический шар, наполненный водородом, поднялся на высоту, где температура воздуха  $0^\circ\text{C}$ . Определите плотность водорода, если давление внутри шара стало равно  $1,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$ .

**Обсуждение результатов:**

- По какой формуле определяется молярная масса газа?
- Как, исходя из приведенных в условии параметров, можно определить плотность газа в метеорологическом баллоне?

**Применение в повседневной жизни:**

- Для чего нужно знать уравнение состояния идеального газа?

Какой из нижеприведенных ответов вы выберете?

1. Уравнение состояния дает возможность определить третий параметр по двум другим известным параметрам, характеризующим состояние газа.
2. Уравнение состояния дает возможность определить ход разных процессов в системе при определенных внешних условиях.
3. Уравнение состояния дает возможность определить изменение состояния системы, окружающей нас.

**Провести самооценку:**

1. Какие понятия повторили на уроке? Что из этого вы хорошо поняли, а что осталось вам не ясным?
2. Что определяет уравнение состояния идеального газа?
3. В исследовании каких явлений используется уравнение состояния?
4. Что характеризует уравнение Клапейрона?
5. Зависимость между какими параметрами газа называется уравнением Менделеева-Клапейрона?
6. При переходе данного газа из одного состояния в другое его давление уменьшается, а температура увеличивается. Как изменится объем газа?
7. Каков физический смысл универсальной газовой постоянной?

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Запишите в рабочем листке определения нижеприведенных понятий, и соответствующие им уравнения: “уравнение состояния идеального газа”, “уравнение Клапейрона”, “уравнение Менделеева-Клапейрона”.

Предположим, что вы принесли с холодной улицы в теплую комнату плотно закрытый баллон с воздухом.

Через некоторое время:

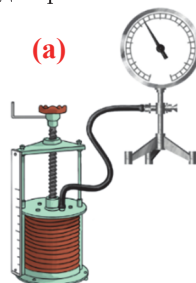
- Какие из параметров, характеризующих состояние воздуха в баллоне, изменятся?
- Какие из параметров, характеризующих состояние воздуха в баллоне, не изменятся?
- Какой формулой можно определить состояние воздуха в баллоне?

**Исследование-1.** Какая закономерная связь существует между двумя другими параметрами газа данной массы, если температура газа остается неизменной?

**Оборудование:** сильфон с подключенным манометром (а).

**Ход исследования.**

1. Отметьте в таблице 6.3 начальные параметры воздуха в сильфоне при комнатной температуре:  
 $p_1 = 10^5 \text{ Па} = 1$  условная единица давления;  $V_1 = 8$  условных единиц объема.
2. Вращая винт, постепенно уменьшайте объем воздуха в сильфоне. Каждый раз отмечайте новое значение объема и соответствующее ему давление.
3. Записав результаты измерений в таблицу, вычислите произведение соответствующих значений объема и давления  $p_1 V_1$ ;  $p_2 V_2$ ; ...



**Обсуждение результатов:** 1. Как изменилось давление газа (воздуха) данной массы с изменением его объема при постоянной температуре (комнатной температуре)? 2. Какая закономерность наблюдается между произведениями соответствующих значений объема и давления  $p_1 V_1$ ;  $p_2 V_2$ ; ... на каждом этапе опыта? 3. К какому выводу приходим из исследования?

Таблица 6.3.

$V$ , усл. ед.	8	7	6	5	4	3	2
$p$ , усл. ед.	1	1,1	...	...	...	...	...

С помощью уравнения состояния идеального газа можно исследовать процессы, при которых сохраняются постоянными масса газа и один из его макроскопических параметров.

• **Газовыми законами** называются законы, определяющие количественную зависимость между двумя макроскопическими параметрами газа данной массы ( $m = \text{const}$ ) при сохранении постоянным значения третьего макроскопического параметра.

• **Изопроцессами** (греч.: izos – “равный”) называются процессы, протекающие в газах данной массы ( $m = \text{const}$ ) при постоянном значении одного из макроскопических параметров.

**Закон Бойля-Мариотта:** Этот закон был определен в 1662 году английским физиком Робертом Бойлем (1627–1691) и в 1676 году французским физиком Эдом Мариоттом (1620–1684).

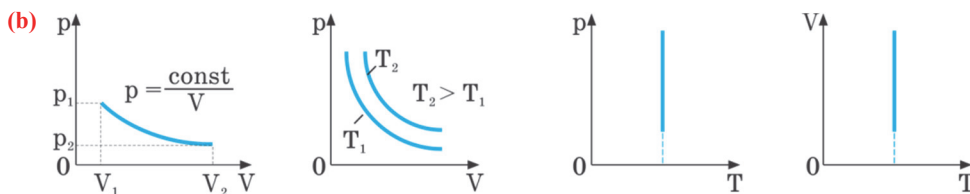
• Для данной массы газа при неизменной температуре произведение давления газа на его объем постоянно ( $T = \text{const}$ ,  $m = \text{const}$ ):

$$pV = \frac{m}{M} RT = \text{const}. \quad (6.20)$$

Для данной массы газа при неизменной температуре произведение давления начального состояния  $p_1$  на его первоначальный объем  $V_1$  равно произведению значений этих параметров  $p_2$  и  $V_2$  произвольного состояния:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 \rightarrow \frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}. \quad (6.21)$$

• **Изотермическим** называется процесс изменения состояния данной массы идеального газа при постоянной температуре ( $T = \text{const}$ ). В изотермическом процессе давление газа и его объем обратно пропорциональны друг другу (b).



**Закон Гей-Люссака:** Этот закон был экспериментально установлен в 1802 году французским физиком Джозефом Луи Гей-Люссаком (1778–1850).

• Для данной массы газа при неизменном давлении отношение объема газа к его абсолютной температуре постоянно ( $p = \text{const}, m = \text{const}$ ):

$$\frac{V}{T} = \frac{mR}{M} \cdot \frac{1}{p} = \text{const}. \quad (6.22)$$

При неизменном давлении отношение первоначального объема  $V_1$  газа к его первоначальной температуре  $T_1$  равно отношению параметров  $V_2$  к  $T_2$  в произвольном состоянии:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}. \quad (6.23)$$

Закон Гей-Люссака можно выразить и так:

• Для данной массы идеального газа при неизменном давлении относительное изменение объема прямо пропорционально изменению температуры ( $p = \text{const}, m = \text{const}$ ):

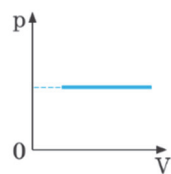
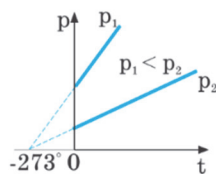
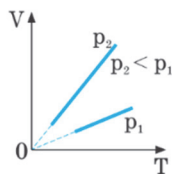
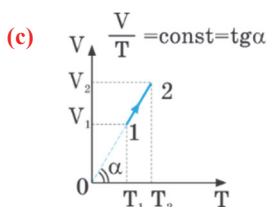
$$\frac{V - V_0}{V_0} = \alpha(t - t_0), \quad t_0 = 0 \Rightarrow V = V_0(1 + \alpha t) \quad (6.24)$$

Где  $V_0$  – объем идеального газа при постоянном давлении при температуре  $0^\circ\text{C}$ ,  $V$  – объем конечного состояния,  $\alpha$  – коэффициент объемного расширения. Опыты показывают, что при нагревании любого разреженного газа на  $1\text{K}$  ( $1^\circ\text{C}$ ), при постоянном давлении, его объем увеличивается приблизительно на  $\frac{1}{273}$  часть объема первоначального состояния:

$$\alpha = \frac{V_{100} - V_0}{100^\circ\text{C} \cdot V_0} \approx \frac{1}{273^\circ\text{C}} = \frac{1}{273\text{ K}}. \quad (6.25)$$

• **Изобарным** называют процесс изменения состояния данной массы идеального газа при постоянном давлении ( $p = \text{const}$ ) (c). При изобарном процессе объем данной массы газа прямо пропорционален его температуре.





**Закон Шарля.** Этот закон экспериментально определил в 1787 году французский физик Шарль Жак Александр Сезар (1746–1823):

- Для данной массы газа при постоянном объеме отношение давления газа к его абсолютной температуре остается неизменным ( $V = \text{const}, m = \text{const}$ ):

$$\frac{p}{T} = \frac{mR}{M} \cdot \frac{1}{V} = \text{const}. \quad (6.26)$$

Отношение первоначального давления  $p_1$  газа к его температуре  $T_1$  равно отношению параметров  $p_2$  к  $T_2$  в произвольном состоянии:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}. \quad (6.27)$$

Закон Шарля можно выразить и так:

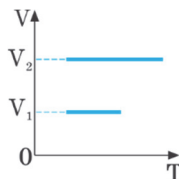
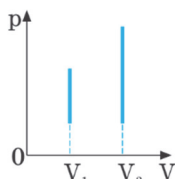
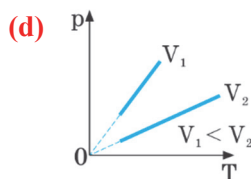
- Для данной массы идеального газа при неизменном объеме относительное изменение давления прямо пропорционально изменению температуры ( $p = \text{const}, m = \text{const}$ ):

$$\frac{p - p_0}{p_0} = \beta (t - t_0), \quad t_0 = 0 \Rightarrow p = p_0(1 + \beta t) \quad (6.28)$$

Где  $p_0$  – давление начального состояния идеального газа (при температуре  $t_0$ ),  $p$  – давление конечного состояния (при температуре  $t$ ),  $\beta$  – коэффициент изменения давления. Из опытов было определено, что при нагревании любого разреженного газа на 1К (1°C), при постоянном объеме, его давление увеличивается приблизительно на  $\frac{1}{273}$  часть давления первоначального состояния:

$$\beta = \frac{p_{100} - p_0}{100^\circ\text{C} \cdot p_0} \approx \frac{1}{273} \frac{1}{^\circ\text{C}} = \frac{1}{273 \text{ K}}. \quad (6.29)$$

- Изохорным называется процесс** изменения состояния данной массы идеального газа при постоянном объеме ( $V = \text{const}$ ) (d). При изохорном процессе давление данной массы газа прямо пропорционально его температуре.



**Закон Дальтона.** Этот закон в 1801 году установил английский исследователь Джон Дальтон (1766–1844):

- Давление смеси химически не взаимодействующих идеальных газов равно сумме парциальных давлений этих газов:

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n. \quad (6.30)$$

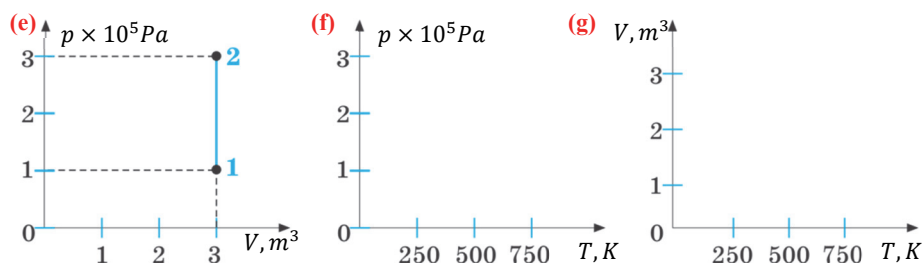
- Парциальное давление – это давление отдельно взятого газа из газовой смеси.

**Закон Авогадро.** Этот закон, как предположение, был выдвинут в 1811 году итальянским физиком Амедео Авогадро (1776–1856). В последующем это предположение было подтверждено многочисленными опытами.

• В равных объемах различных газов, взятых при одинаковых температурах и давлении, содержится одинаковое число молекул. Например, число молекул в 1 моле произвольного газа равно:  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>. При нормальных условиях объём 1 моля газа равен 22,4 л (л/моль). Этот объём называют **молярным объёмом идеального газа**.

#### Исследование-2. Применение. Какой изопроцесс представлен на графике?

**Задача.** Над идеальным газом был совершен процесс, представленный на рисунке (е). Постройте для этого процесса графики зависимости  $p - T$  (f) и  $V - T$  (g). Температура газа в начальном состоянии 250 К.



#### Обсуждение результатов:

- График какого изопроцесса над идеальным газом дан в задаче?
- Как выглядят графики зависимости  $p - T$  (f) и  $V - T$  (g) для этого процесса?

**Применение в повседневной жизни:** Процесс дыхания, как важнейший атрибут нашей жизни, является физическим процессом. Так, при дыхании межреберные мышцы и диафрагма периодически меняют объем грудной клетки. При расширении грудной клетки давление воздуха в легких падает ниже атмосферного, и в результате происходит процесс вдоха. Другими словами, до уравнивания давления воздуха в легких с давлением воздуха окружающей среды происходит самостоятельное течение воздуха в легкие извне. При выдохе же происходит обратный процесс: в результате уменьшения объема легких давление воздуха в них больше атмосферного давления, и воздух выходит из легких в атмосферу.

- Какой изопроцесс происходит при вдохе и выдохе?

#### Провести самооценку:

1. Какие понятия повторили на уроке? Что из этого вы хорошо поняли, а что осталось вам не ясным?
2. Что определяет газовый закон?
3. Что такое изопроцесс?
4. В чем состоит смысл закона Бойля-Мариотта?
5. Что определяет закон Гей-Люссака?
6. Каков физический смысл коэффициента объемного расширения?
7. Связь между какими параметрами газа определяет закон Шарля?

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Запишите в рабочем листке определения для следующих понятий: “газовый закон”, “изопроцесс”, “закон Бойля-Мариотта”, “закон Гей-Люссака”, “закон Шарля”, “закон Дальтона”, “закон Авогадро”, “изотермический процесс”, “изохорный процесс”, “изобарный процесс”.

## 6.7 СВОЙСТВА ПАРОВ: НАСЫЩЕННЫЙ И НЕНАСЫЩЕННЫЙ ПАР

Туман – одно из наиболее часто наблюдаемых природных явлений в сельской местности и в городе.

- Чем, по вашему мнению, отличаются представления о тумане у жителей больших городов и людей, живущих в сельской местности?
- Что представляют собой туман в его научном понимании: когда и где он образуется?
- Наблюдали ли вы туман дома? Ответ обоснуйте.

### Исследование-1. Почему размеры капли очень малы?

**Оборудование:** предметные стекла (2 шт.), спирт, вода, растительное масло, пипетка, спиртовка (или свечка), вентилятор.

**Ход исследования.**

1. Капните одинаковое количество каждой жидкости (спирт, вода и растительное масло) на предметное стекло. Проведите наблюдения за тем, как изменяются размеры капель на поверхности предметного стекла, и сделайте выводы.
2. Капните пипеткой одинаковое количество воды на поверхность двух предметных стекол. Нагревая одно из предметных стекол снизу, проведите наблюдения за каплями на поверхности обоих стекол и сделайте выводы.
3. Капните пипеткой одинаковое количество спирта на поверхность двух предметных стекол. Отложив одно из предметных стекол в сторону, направьте струю воздуха от вентилятора на другое. Проведите наблюдения за каплями на поверхности обоих стекол.

**Обсуждение результатов:**

1. К какому выводу пришли из наблюдения за каплями из трех разных жидкостей на поверхности стекла в первом опыте: у какой из капель размеры уменьшились быстрее? Почему?
2. Что выяснили из второго и третьего опытов?

**Испарение.** В жидкостях (и твердых телах) при любой температуре существует некоторое количество молекул (или атомов), кинетическая энергия которых больше потенциальной энергии взаимодействия с соседними молекулами. Если такие молекулы находятся поблизости от поверхности жидкости, то они с легкостью покидают поверхность и создают над ее поверхностью пар.

• **Парообразованием** называется процесс перехода вещества из жидкого состояния в газообразное.

Парообразование осуществляется двумя способами: *испарением и кипением.*

• **Испарение** – это парообразование, происходящее с открытой поверхности жидкости при любой температуре.

• **Кипение** – это парообразование, происходящее по всему объему жидкости при определенной температуре (см.: физика-8, стр. 75–76).

При испарении частицы, обладающие большой кинетической энергией, покидают поверхность жидкости. В результате происходит уменьшение среднего значения кинетической энергии оставшихся частиц жидкости. Поэтому в процессе испарения наблюдается охлаждение жидкости (только если жидкости не передается теплота со стороны).

Скорость испарения зависит от: *температуры жидкости, площади свободной поверхности жидкости, скорости течения воздуха, окружающего поверхность жидкости, давления, оказываемого на поверхность жидкости (с увеличением давления скорость испарения уменьшается), удельной теплоты парообразования жидкости, то есть от рода жидкости.*

• Удельная теплота парообразования численно равна количеству теплоты, необходимому для полного превращения жидкости массой 1 кг в пар при постоянной температуре:

$$L = \frac{Q}{m}. \quad (6.31)$$

Где  $L$  – удельная теплота парообразования,  $Q$  – теплота парообразования. Единица измерения удельной теплоты парообразования в СИ:

$$[L] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} = 1 \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}.$$

Значение удельной теплоты парообразования зависит от рода жидкости и её температуры – с увеличением температуры значение удельной теплоты парообразования уменьшается. Минимальное значение удельной теплоты парообразования соответствует температуре кипения жидкости.

• Теплота парообразования – это количество теплоты, необходимое для превращения жидкости массой  $m$  в пар при постоянной температуре:

$$Q = Lm. \quad (6.32)$$

Процесс, обратный парообразованию, один из природных процессов, называемый *конденсацией*, при котором пар превращается в жидкость.

• **Конденсация** – это процесс превращения пара в жидкость. Конденсируемый пар передает окружающей среде количество теплоты  $Q = Lm$ . При конденсации пара выделяется такое же количество теплоты, которое было затрачено на парообразование сконденсировавшейся жидкости.

**Насыщенный и ненасыщенный пар.** По характеру зависимости плотности и давления от температуры пар может быть насыщенным и ненасыщенным.

• **Насыщенный пар** – это пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью. Динамическое равновесие между жидкостью и её паром возникает тогда, когда число молекул, покидающих свободную поверхность жидкости, становится равным числу молекул, возвращающихся в жидкость. Насыщенный пар возникает над свободной поверхностью жидкости в закрытом сосуде.

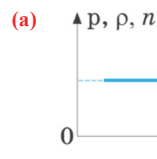
Если же сосуд открыт, то часть молекул, покинувших поверхность жидкости, испаряется в атмосферу и не возвращается в жидкость, то есть нарушается динамическое равновесие и пар переходит в ненасыщенное состояние.

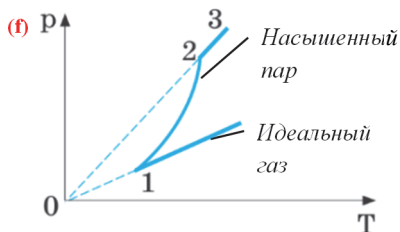
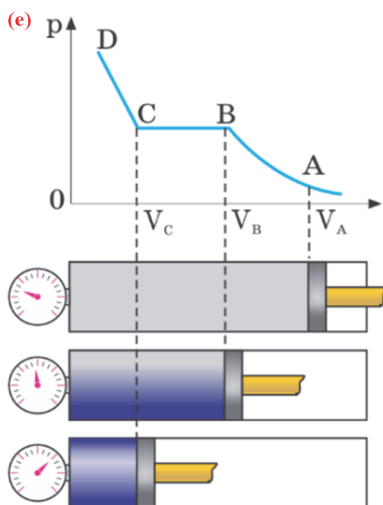
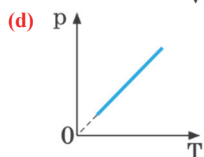
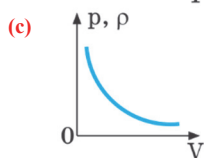
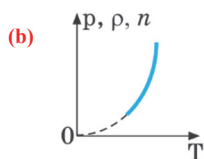
• **Ненасыщенный пар** – это пар, не находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью.

#### Свойства насыщенного пара:

а) давление, плотность и концентрация насыщенного пара при постоянной температуре от объема пара не зависят, то есть насыщенный пар не подчиняется закону Бойля-Мариотта (а);

б) с повышением температуры давление, плотность и концентрация насыщенного пара резко увеличиваются, то есть насыщенный пар не подчиняется закону Шарля. Это происходит потому, что увеличение давления насыщенного пара происходит в соответствии с





выражением  $p = nkT$  не только за счет повышения температуры, но и одновременно за счет увеличения концентрации (плотности) молекул пара (b).

### Свойства ненасыщенного пара:

а) давление и плотность ненасыщенного пара данной массы при постоянной температуре обратно пропорциональны его объему, то есть для ненасыщенного пара выполняется закон Бойля-Мариотта (c);

б) давление ненасыщенного пара данной массы при постоянном объеме прямо пропорционально его температуре, то есть для ненасыщенного пара выполняется закон Шарля (d).

**Пар может переходить из ненасыщенного состояния в насыщенное и наоборот.**

• При изотермическом расширении насыщенного пар может превратиться в ненасыщенный пар.

• При изотермическом сжатии ненасыщенный пар может превратиться в насыщенный пар.

Это происходит так. Предположим, что в цилиндре, подключенном к манометру, под поршнем находится ненасыщенный пар при температуре  $T$ , объем которого равен  $V_A$  (e). При изотермическом сжатии пара его объем уменьшается, а давление, плотность и концентрация увеличиваются (участок АВ графика).

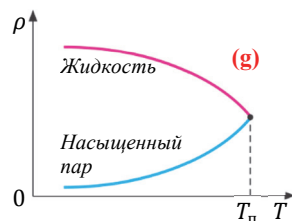
При достижении объема пара значения  $V_B$  он начинает конденсироваться, в цилиндре образуются капельки жидкости – пар переходит в насыщенное состояние. Давление, плотность и концентрация пара принимают максимальное значение при данной температуре. Дальнейшее уменьшение объема приводит к конденсации пара и превращению его в жидкость (участок ВС графика). Этот процесс продолжается до полного превращения насыщенного пара в жидкость (точка С). Дальнейшее сжатие производится над жидкостью, и очень малая сжимаемость жидкости, приводит к резкому увеличению показаний манометра (участок CD графика).

• При изохорном нагревании насыщенный пар превращается в ненасыщенный. На графике зависимости давления пара от температуры при постоянном объеме участок 1–2 соответствует насыщенному состоянию пара (f).

**Примечание.** При изотермическом сжатии превращение насыщенного пара в жидкость возможно только при температуре ниже *критической температуры*.

• *Критическая температура* – это температура, при которой исчезают физические различия между жидкостью и ее насыщенным паром. При критической температуре плотность насыщенного пара равна плотности жидкости (**g**).

При температуре выше критической температуры вещество может находиться только в одном агрегатном состоянии – газообразном (пар) состоянии и ни при каких давлениях оно не превращается в жидкость. Значение критической температуры зависит только от рода пара. Например, для гелия  $T_{кр} = 4K$ , для азота  $T_{кр} = 12K$ .



### Исследование-2. Применение. Сравните массы паров

**Задача.** Сравните массы паров в точках 1, 2 и 3 графика зависимости давления водяного пара от температуры при постоянном объеме (см: **f**).

**Обсуждение результатов:** • Как изменяется масса пара на участках 1–2 и 2–3 графика зависимости давления водяного пара от температуры при постоянном объеме? Почему?

**Применение в повседневной жизни:** Представьте себе струю пара, выходящую через маленькое отверстие на крышке только что закипевшего самовара.

• Струя пара становится видна только на определенном расстоянии от выходного отверстия. Почему?

**Провести самооценку:** 1. Какие понятия повторили на уроке? Что из этого вы хорошо поняли, а что осталось вам не ясным? 2. Какой процесс характеризует превращение жидкости в газообразное состояние и наоборот? 3. Какова “функция” вентилятора? 4. Какой пар является насыщенным? Почему? 5. В чем отличие свойств насыщенного пара от ненасыщенного? 6. Как можно превратить ненасыщенный пар в насыщенный? 7. Как можно превратить насыщенный пар в ненасыщенный?

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Запишите в рабочем листке определения для следующих понятий: “парообразование”, “испарение”, “насыщенный пар”, “ненасыщенный пар”, “удельная теплота парообразования”, “теплота парообразования”, “конденсация”, “критическая температура”.

## 6.8 Влажность воздуха. точка росы

Иногда воздух, которым мы дышим, бывает сухой, а иногда влажный.

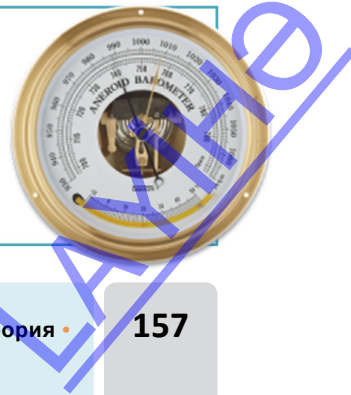
- Как зависят сухость и влажность воздуха от степени его насыщения водяным паром?
- Какой воздух более тяжелый при данных температуре и давлении: 1 кубический метр сухого или один кубический метр влажного воздуха? Почему?
- В каком воздухе испарение, а значит, и охлаждение нашего тела происходит быстрее: в сухом или влажном? Почему?

### Исследование-1. Почему во влажном воздухе давление падает?

**Задача-1.** В составе влажного воздуха имеется гораздо большее количество молекул воды, чем в сухом. Однако перед дождем, при увеличении влажности воздуха, показание барометра-анероида падает. Почему?

**Обсуждение результатов:**

- Как влияет падение давления воздуха на его плотность?
- Почему при увеличении влажности воздуха атмосферное давление падает?





**Влажный воздух** – это воздух, в составе которого имеется водяной пар. Основными количественными характеристиками такого воздуха являются *абсолютная и относительная влажность*.

• **Абсолютная влажность** – это физическая величина, равная плотности водяного пара в воздухе в данных условиях.

Абсолютную влажность (плотность водяного пара в воздухе) можно выразить через парциальное давление водяного пара на основании уравнения Менделеева-Клапейрона:

$$\rho_v = \frac{p_p M}{RT}. \quad (6.33)$$

Где  $\rho_v$  – плотность водяного пара в воздухе – абсолютная влажность,  $M = 18 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$  – молярная масса воды,  $T$  – температура воздуха,  $p_p$  – парциальное давление пара,  $R$  – универсальная газовая постоянная. Обычно абсолютная влажность измеряется в  $\text{г/м}^3$ .

Однако невозможно определить, в каком состоянии находится пар, насколько он отличается от насыщенного состояния, зная только плотность и парциальное давление водяного пара при данных условиях. Поэтому была введена вторая характеристика степени увлажнения воздуха – *относительная влажность*.

• **Относительная влажность** – это физическая величина, равная отношению абсолютной влажности воздуха при данной температуре к плотности насыщенного водяного пара при той же температуре. Относительная влажность выражается в процентах:

$$\varphi = \frac{\rho_v}{\rho_0} \cdot 100\%. \quad (6.34)$$

Где  $\rho_0$  – плотность насыщенного водяного пара в воздухе,  $\varphi$  – относительная влажность воздуха.

Ссылаясь на связь плотности водяного пара в воздухе с его парциальным давлением, из равенства (6.33) относительную влажность можно выразить через давление:

• **Относительная влажность равна отношению парциального давления водяного пара в воздухе при данной температуре к давлению насыщенного водяного пара при той же температуре:**

$$\varphi = \frac{p_p}{p_0} \cdot 100\%. \quad (6.35)$$

Таким образом, относительная влажность определяется не только абсолютной влажностью, но и температурой воздуха. Относительная влажность воздуха измеряется с помощью психрометра и гигрометра (см.: физика-8, стр.83–86).

Если парциальное давление водяного пара в воздухе при данной температуре будет равно давлению насыщенного пара при той же температуре, то состояние водяного пара в воздухе будет насыщенным. Если плотность водяного пара в воздухе при данной температуре больше плотности насыщенного водяного пара при той же температуре, то в этом случае говорят, что водяной



пар в воздухе находится в *перенасыщенном* состоянии. Такое состояние приводит к конденсации пара.

*Температура, при которой в результате изобарного охлаждения водяной пар в воздухе превращается в насыщенный, называется точкой росы.* При падении температуры воздуха ниже точки росы происходит конденсация водяного пара. Например, предположим, что температура воздуха днем  $t_1 = 32^\circ\text{C}$ , а плотность водяного пара в воздухе составляет  $\rho_v = 20,5 \text{ г/м}^3$ . Ночью же температура воздуха  $t_2 = 18^\circ\text{C}$ , плотность насыщенного водяного пара при этой же температуре  $\rho_0 = 10,2 \text{ г/м}^3$ . Значит, излишки пара конденсируются, то есть выпадает роса. Этот процесс является причиной возникновения тумана, облаков и дождей.

**Исследование-2. Применение. Чему равно парциальное давление водяного пара в воздухе?**

**Задача-2.** В Баку при температуре  $16^\circ\text{C}$  относительная влажность 80%. Вычислите парциальное давление водяного пара в воздухе (давление насыщенного водяного пара в воздухе при температуре  $16^\circ\text{C}$  равно 0,8 kPa).

**Обсуждение результатов:**

- Какова связь между относительной влажностью воздуха и парциальным давлением водяного пара воздуха при данной температуре?
- Чему равно парциальное давление водяного пара в воздухе, вычисленное на основании условия задачи?

**Применение в повседневной жизни:**

- Какую роль играет в нашей жизни влажность воздуха?
- В каком из сезонов влажность воздуха наибольшая: зимой или летом? Почему?

**Провести самооценку:**

1. Какие понятия повторили на уроке? Что из этого вы хорошо поняли, а что осталось вам не ясным?
2. Что означает “влажный воздух”?
3. Чем отличаются физические смыслы понятий “абсолютная влажность” и “относительная влажность” по своим физическим смыслам?
4. Что такое “точка росы”?
5. Как изменяется влажность воздуха в классной комнате с повышением температуры?
6. Как изменяется абсолютная и относительная влажность воздуха с повышением температуры?
7. Как определяется относительная влажность воздуха при помощи психрометра (см.: физика-8, стр.85-86)?

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Запишите в рабочем листке определения для следующих понятий: “влажный воздух”, “абсолютная влажность”, “относительная влажность (по плотности)”, “относительная влажность (по давлению)” “перенасыщенный пар”, “точка росы”.

## 6.9 ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ. КАПИЛЛЯРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Наверно, вы в детстве неоднократно сооружали из влажного песка “замки”.

- Почему эти “строительные” работы производятся влажным песком, а не сухим?



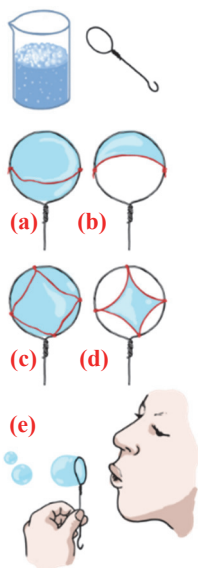
Неоднократно на уроках рисования вы наблюдали, как слипшиеся сухие волоски кистей раскрывались при опускании их в воду.

- Почему слипшиеся волоски кисти раскрываются в воде, а при вынимании кисти из воды снова слипаются?
- Задумывались ли вы над причиной возникновения этих явлений?



### Исследование-1. Эксперимент с мыльным раствором

**Оборудование:** изготовленное из проволоки кольцо с ручкой, поджаренный сахарный песок (5–10 гр), мыльная стружка (5–10 гр), вода (0,5 л), лабораторная посуда (3 штуки по 250 мл), нить, водонагреватель, иголка, спички.



**Ход исследования.** 1. Приготовьте мыльный раствор: для этого растворите в 100 мг воды поджаренный сахарный песок. Растворите в другой посуде в 100 мг теплой воды мыльные стружки. Смешайте оба раствора в одной посуде – мыльный раствор готов! 2. Закрепите нить, не натягивая, вдоль диаметра кольца и, опустив его в мыльный водный раствор, медленно вытащите. Пронаблюдайте возникшее явление (a). 3. Нагрев один конец иглы, проткните им мыльную пленку по одну сторону от нити в кольце. Пронаблюдайте возникшее явление (b). 4. Закрепив на кольце четыре отрезка нити в форме квадрата в кольце, опустите его в мыльный раствор, а затем медленно вытащите. Пронаблюдайте возникшее явление (c). 5. Нагретым концом иглы проткните мыльную пленку по внешним краям квадрата и пронаблюдайте возникшее явление (d). 6. Опустите пустое кольцо в мыльный раствор, а затем медленно его вытащите и постарайтесь выдуть мыльную пленку из кольца. Повторите опыт несколько раз и пронаблюдайте, какую форму приобретает мыльная пленка, оторвавшись от кольца (e).

#### Обсуждение результатов:

- Что необычного наблюдается в опытах с изменением формы мыльной пленки, образованной нитями в каркасе?
- Как можно объяснить с точки зрения МКТ причину уменьшения площади мыльной пленки, образованной в каркасе?
- Почему мыльная пленка, оторвавшись от каркаса, сразу преобразуется в сферическую форму?

**Сила поверхностного натяжения.** В отличие от газов жидкости имеют свободную поверхность. Молекулы, расположенные на поверхности жидкости, и молекулы внутри жидкости находятся в разных условиях:

а) молекулы внутри жидкости окружены другими молекулами жидкости со всех сторон. Молекула 1 внутри жидкости испытывает действие соседних молекул со всех сторон, поэтому равнодействующая сил притяжения, действующих на нее, равна нулю (**f**; **молекула 1**);

б) молекулы на поверхности жидкости испытывают действие со стороны соседних молекул жидкости только сбоку и снизу. Притяжение со стороны молекул газа (пара жидкости или воздуха) над жидкостью во много раз слабее, чем со стороны молекул жидкости, поэтому не принимаются во внимание (**f**; **молекула 2**). В результате каждая из равнодействующих сил  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$ , действующих на молекулу 2 со стороны соседних молекул внутри жидкости, состоит из двух составляющих: параллельные поверхности жидкости силы  $\vec{F}_{1||}$  и  $\vec{F}_{2||}$  и перпендикулярные этой поверхности  $\vec{F}_{1\perp}$  и  $\vec{F}_{2\perp}$ . Под действием перпендикулярных составляющих молекулы поверхностного слоя стремятся вглубь жидкости, вследствие этого поверхностный слой оказывает на жидкость давление. Под действием параллельных составляющих создаются силы, удерживающие поверхность в натянутом состоянии, то есть силы *поверхностного натяжения*  $\vec{F}_H$ .

• *Сила поверхностного натяжения – это сила, направленная по касательной к поверхности жидкости, перпендикулярно к линии, ограничивающей поверхность жидкости, и стремящаяся сократить площадь поверхности жидкости. Сила поверхностного натяжения прямо пропорциональна длине границы соприкосновения свободной поверхности жидкости с твердым телом:*

$$F_H = \sigma \cdot l. \quad (6.36)$$

Здесь  $F_H$  – сила поверхностного натяжения жидкости,  $l$  – длина границы соприкосновения свободной поверхности жидкости с твердым телом,  $\sigma$  (сигма) – коэффициент поверхностного натяжения:

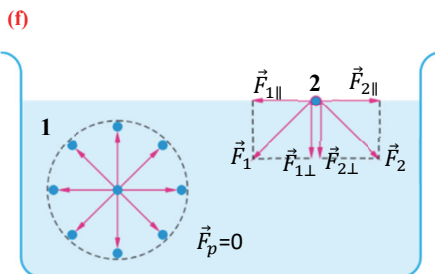
• *Коэффициент поверхностного натяжения – численно равен силе поверхностного натяжения, приходящейся на единицу длины линии, ограничивающей поверхность жидкости:*

$$\sigma = \frac{F_H}{l}. \quad (6.37)$$

Значение коэффициента поверхностного натяжения зависит от вида жидкости и ее температуры, то есть с увеличением температуры жидкости коэффициент его поверхностного натяжения уменьшается и при критической температуре равен нулю. Единица коэффициента поверхностного натяжения в СИ:

$$[\sigma] = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}}.$$

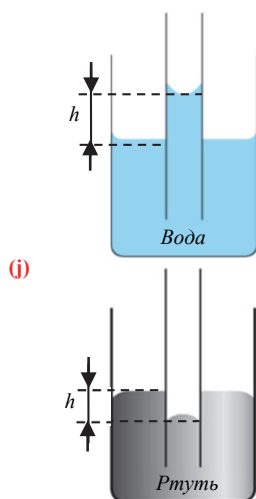
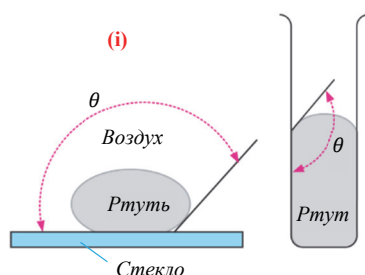
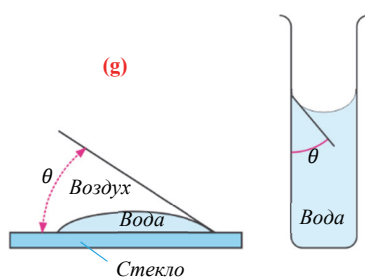
**Смачивающая и несмачивающая жидкость.** При внимательном рассмотрении можно увидеть искривление поверхности жидкости на границе между жидкостью и твердым телом.



• **Мениск** – это искривление свободной поверхности жидкости в месте ее соприкосновения с поверхностью твердого тела (или другой жидкости). Угол между поверхностью мениска и поверхностью твердого тела называется **краевым углом**.

Значение краевого угла  $\theta$  (тетта) зависит от того, является ли жидкость смачивающей или несмачивающей твердое тело:

• **Смачивающая жидкость** – это жидкость, у которой краевой угол острый. Сила взаимного притяжения между молекулами смачивающей жидкости и твердого тела больше, чем силы взаимного притяжения между молекулами самой жидкости. В результате свободная поверхность жидкости в сосуде становится вогнутой, например, вода в стеклянном сосуде – смачивающая жидкость (**г**).



• **Несмачивающая жидкость** – это жидкость, у которой краевой угол тупой. Сила взаимного притяжения между молекулами несмачивающей жидкости и твердого тела меньше, чем сила взаимного притяжения между молекулами самой жидкости. В результате свободная поверхность жидкости в сосуде бывает выпуклой, например, ртуть в стеклянном сосуде – несмачивающая жидкость (**и**).

**Капиллярные явления.** В повседневной жизни встречаются и используются тела, с легкостью впитывающие в себя воду, например, полотенце, промокательная бумага, сахар, кирпич, растения и др. Это свойство в телах объясняется существованием в них большого количества очень узких трубочек – капилляров.

• **Капилляр** – это узкая трубка (канал) диаметром меньше  $10^{-3}$  м.

Уровень жидкости внутри капилляра, опущенного в жидкость, в зависимости от ее свойств (смачивающая или несмачивающая), отличается от общего уровня жидкости:

• **Капиллярными явлениями** называют явления подъема смачивающей и опускания несмачивающей жидкости по капилляру относительно общего уровня жидкости под действием сил поверхностного натяжения (**и**).

В таблице 6.4 дана зависимость между величинами, характеризующими жидкость, поднимающуюся в капилляре.

Таблица 6.4

Характеристики жидкости, поднимающейся в капилляре	Формула
Вес жидкости, поднимающейся в капилляре	$P = mg = F_H = \sigma l = 2\pi r\sigma = \pi d\sigma.$ (6.37) Где $r$ – радиус капилляра, $d$ – диаметр капилляра.
Масса жидкости, поднимающейся в капилляре	$m = \frac{F_H}{g} = \frac{2\pi r\sigma}{g} = \frac{\pi d\sigma}{g}.$ (6.38)
Высота жидкости, поднимающейся в капилляре	$h = \frac{2\sigma \cdot \cos\theta}{\rho g r} = \frac{4\sigma \cos\theta}{\rho g d}.$ (6.39) Если жидкость полностью смачиваемая, то получаем $\theta = 0^\circ \rightarrow \cos\theta = \cos 0^\circ = 1$ : $h = \frac{2\sigma}{\rho g r} = \frac{4\sigma}{\rho g d}.$ (6.40) Где $\rho$ – плотность жидкости, поднимающейся в капилляре. <i>Высота подъема жидкости в капилляре зависит от рода жидкости и обратно пропорциональна радиусу капилляра.</i>
Давление жидкости, поднимающейся в капилляре	$p = \rho g h = \rho g \cdot \frac{2\sigma}{\rho g r} = \frac{2\sigma}{r} = \frac{4\sigma}{d}.$ (6.41)

### Исследование-2. Применение. Чему равен коэффициент поверхностного натяжения?

**Задача.** Чему будет равен коэффициент поверхностного натяжения данной жидкости, если для отрыва от поверхности жидкости кольца диаметром 5 см к нему прилагается сила 0,016 Н?

#### Обсуждение результатов:

- По какой формуле определяется коэффициент поверхностного натяжения жидкости и от чего он зависит?

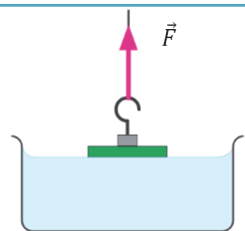
#### Применение в повседневной жизни:

Для увеличения времени эксплуатации металлических изделий (корпуса кораблей, цистерн, труб и др.) их поверхность покрывают слоем масляной краски с целью защиты от химической коррозии жидкостью.

- Что означает “слой масляной краски защищает металл от химической коррозии жидкостью”? Как это можно связать с поверхностными свойствами жидкостей?

#### Провести самооценку:

- Какие понятия повторили на уроке? Что из этого вы хорошо поняли, а что осталось вам не ясным?
- Что означает “свободная поверхность жидкости обладает особым свойством”?
- Что такое поверхностное натяжение жидкости? В чем состоит его физический смысл?
- Какие явления возникают при взаимодействии молекул жидкости и твердого тела?
- Как можно определить, является жидкость смачивающей или несмачивающей?
- В чем состоит физический смысл капиллярных явлений?
- Приведите примеры капиллярных явлений, происходящих в природе и быту.



**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Запишите в рабочем листке нижеприведенные определения, понятия и формулы: “сила поверхностного натяжения”, “коэффициент поверхностного натяжения”, “мениск”, “смачивающая жидкость”, “несмачивающая жидкость”, “капилляры”, “капиллярные явления”.

## 6.10 ТВЕРДЫЕ ТЕЛА И НЕКОТОРЫЕ ИХ СВОЙСТВА

Существует выражение “трескучие морозы”, возникновение которого связано с тем, что в морозную погоду в лесу толстоствольные деревья и пни, а также старые деревянные стены домов, трещат, то есть словно трескаются. Наверно, ученики сельской местности такие явления наблюдали неоднократно.



- Почему на морозе (“трескучие морозы”) в лесу толстоствольные деревья и пни, а также старые деревянные стены домов “трескаются”?



Вы знаете, что лед – твердое состояние воды.

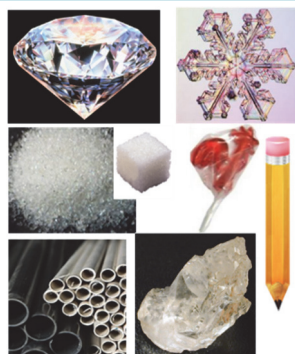
- Почему лед не тонет в воде?

### Исследование-1. Чем отличаются твердые тела друг от друга?

**Задача.** Мы живем на поверхности земного шара, являющегося твердым телом, живем в домах, построенных из твердых тел, сидим на партах в классе, изготовленных из твердых тел. Также твердыми телами являются карандаш, сахарный песок, леденец, соль, стекло, смола, драгоценные камни, каучук, снежинки, пластмассовые изделия. Несмотря на то, что наше тело на 70% состоит из воды, оно тоже твердое.

#### Обсуждение результатов:

- По каким свойствам можно различать эти тела?
- В чем состоит общее свойство для всех твердых тел?



**Твердые тела** – это тела, сохраняющие свою форму и объем при отсутствии внешнего воздействия. Например, тела, изготовленные из металла, пластмассы, стекла и эбонита, являются твердыми телами. Твердые тела по своей природе и физическим свойствам делятся на две группы: *кристаллические и аморфные тела*. К *кристаллическим телам* относятся минералы, например, поваренная соль, кварц, горный хрусталь, металлы в твердом состоянии. К *аморфным же телам* относятся эбонит, стекло, пластмассы, смола, канифоль, янтарь, опал, обсидиан и другие. Чем отличаются кристаллические тела от аморфных?

**Кристаллические тела.** Частички кристаллических тел (атомы, молекулы или ионы) обладают в пространстве упорядоченным расположением, образующим кристаллическую решетку. Кристаллическим телам присуща определенная температура плавления.

• Места расположения частиц в кристаллической решетке называют узлами кристаллической решетки.

Идеальное кристаллическое тело состоит из множества повторяющихся в пространстве кристаллических ячеек на произвольном удалении. По этой причине в кристаллических телах наблюдается расположение их частиц в дальнем порядке.

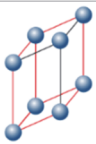

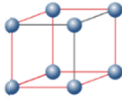

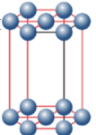

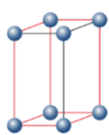

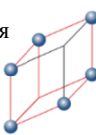

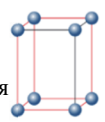

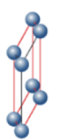

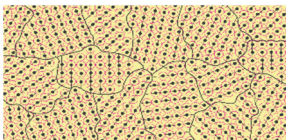


Кристаллические тела могут быть *монокристаллическими* (*моно* – “еди-ница”) и *поликристаллическими* (*поли* – “много”).

• **Монокристалл** – это кристалл, возникающий в результате роста его из одного центра.

В результате упорядоченного расположения частиц монокристалл имеет симметричную геометрическую форму, ограниченную плоскими поверхностями (а).

Основное свойство монокристаллов – их *анизотропность*:

(а) Моноклинная симметрия 	Гипс 	Кубическая симметрия 	Свинцовая руда 
Гексагональная симметрия 	Изумруд 	Тетрагональная симметрия 	Идокраз 
Тригональная симметрия 	Кварц 	Орторомбическая симметрия 	Топаз 
Триклинная симметрия 	Аксинит 	(b) 	

• **Анизотропность** – это зависимость физических свойств вещества (механических, тепловых, электрических, оптических и др.) от направления. Например, тепловое расширение монокристалла в разных направлениях разное.

Большинство твердых тел, встречающихся в природе и получаемых на производстве, состоит из маленьких беспорядочно ориентированных монокристаллов. Такие твердые тела называются *поликристаллами*:

• **Поликристаллы** возникают в результате роста и соединения многочисленных монокристаллов, хаотично ориентированных в пространстве.

Все металлы, можно сказать, поликристаллы. Например, если внимательно посмотреть на свежий разлом чугуна, то видно, что он состоит из многочисленных кристаллических зерен, не имеющих правильную форму и направленных в разные стороны (b). Каждое кристаллическое зерно поликристалла в отдельности – анизотропно, однако, ввиду того, что эти зерна расположены беспорядочно, поликристалл в целом *изотропен*:

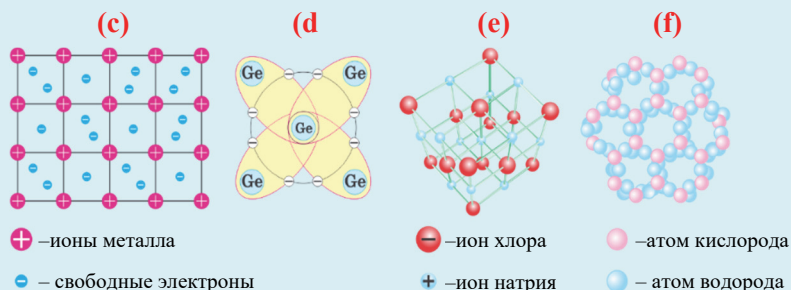
• **Изотропностью** называется независимость физических свойств от направления. Например, тепловое расширение поликристалла, можно сказать, во всех направлениях одинаково.



**Виды кристаллической решетки.** В зависимости от вида химической связи и взаимодействия между частицами, расположенными в узлах кристаллической решетки, существуют четыре вида кристаллических решеток. Это *металлическая, атомная, ионная и молекулярная кристаллическая решетка*.

**Металлическая решетка.** В узлах металлической решетки находятся *положительные ионы металла*. Такие кристаллы возникают в результате взаимодействия между атомами одного вида металла с очень маленькой энергией ионизации. Внешние валентные электроны в атомах металлов очень слабо связаны с ядром. При переходе в твердое состояние атомы располагаются настолько близко друг к другу, что валентные электроны покидают свой атом и становятся свободными внутри кристалла.

Освобожденные валентные электроны в виде электронного газа беспорядочно движутся между положительными ионами кристаллической решетки и, связывая их, образуют металлическую связь (с). Концентрация свободных электронов в металле равна концентрации ионов.



**Атомная решетка.** В узлах атомной решетки находятся *нейтральные атомы*. Ковалентная связь между атомами возникает за счет электронной пары их валентных электронов. Ковалентная связь характерна для кристаллов *sp* элементов. Как пример таких кристаллов можно привести кремний, германий и другие. Атомы этих элементов на внешнем электронном уровне имеют четыре валентных электрона. Каждый электрон такого атома образует ковалентную связь с одним из электронов соседнего атома, в результате образуются четыре ковалентные связи. Таким образом, атом, присоединив к себе четыре электрона, приобретает устойчивую электронную конфигурацию восьмиэлектронного инертного газа  $s^2p^6$ . В ковалентной связи движение электронов имеет направленный характер, то есть каждый электрон движется вокруг ядер четырех атомов (d).

**Ионная решетка.** В узлах ионной решетки находятся положительные и отрицательные ионы. Ионная связь возникает из-за обмена электронами в результате взаимодействия двух разных атомов с малой и большой энергией ионизации. Кулоновская сила притяжения между ионами противоположных знаков удерживает их в узлах кристаллической решетки. Как образец такого вида вещества можно привести кристаллическую решетку соединения водорода с щелочным металлом, например, NaCl (e).

**Молекулярная решетка.** В узлах молекулярной кристаллической решетки находятся молекулы. Молекулы, располагаясь в определенном порядке, создают друг с другом межмолекулярную связь. Находящиеся в газообразном состоянии водород, хлор, четырехокисный углерод в твердом состоянии образуют молекулярную решетку. У кристаллов такого типа связь между молекулами очень слабая, поэтому она разрушается при низких температурах, то есть вещество плавится. Это можно ясно видеть на модели кристалла льда (f). Из модели видно, что каждый атом кислорода окружен четырьмя атомами водорода. Атомы водорода играют связывающую роль между атомами кислорода. При нагревании льда его кристаллическая решетка быстро разрушается.

**Аморфные тела.** Аморфные тела характеризуются отсутствием дальнего порядка в расположении частиц. Так как этот порядок выполняется только для соседних частиц, то говорят, что аморфные тела — это твердые тела, частицы

которых обладают *близким порядком расположения*. Высококонцентрированные жидкости (вязкие жидкости) можно отнести к твердым аморфным телам.

• **Аморфные тела** – это твердые тела, частички которых не упорядочены в пространстве, и физические свойства внутри по всем направлениям одинаковы – они *изотропны*. У аморфных тел нет определенной температуры плавления, то есть по мере нагревания они *смягчаются и превращаются в жидкость*.

Вещества могут переходить из аморфного состояния в кристаллическое и обратно. Например, если сначала расплавить кристалл сахара, а затем охладить его, он превращается в аморфный леденец (“стеклянную” конфету). С течением времени на поверхности леденца снова начинают возникать кристаллы сахара.

### Плавление и отвердевание, сублимация и десублимация.

• Процесс перехода вещества из *твдого* состояния в жидкое называется **плавлением**, а процесс перехода из жидкого состояния в твердое – **отвердеванием**, или **кристаллизацией**.

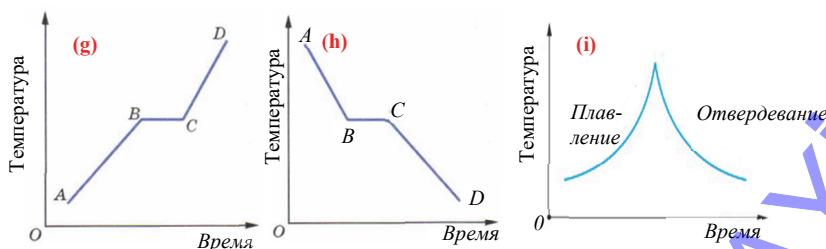
Плавление кристаллического тела происходит при определенной температуре – *температуре плавления*, например, температура плавления вольфрама  $3410^{\circ}\text{C}$ , льда  $0^{\circ}\text{C}$ , ртути –  $39^{\circ}\text{C}$ .

• Температура, при которой данный кристалл плавится, называется **температурой плавления**, или **точкой плавления**.

Опыты показывают, что для плавления тела не достаточно нагреть его до температуры плавления, а необходимо продолжать передачу количества теплоты. Однако несмотря на нагревание, температура плавящегося кристалла не увеличивается. Только после того, как кристалл полностью расплавится, передаваемое ему количество теплоты приводит к увеличению температуры полученной жидкости (g). Участок АВ графика плавления кристаллического тела соответствует нагреванию твердого тела до температуры плавления; участок ВС графика соответствует процессу плавления, в это время тело находится как в твердом, так и жидком состоянии; участок CD графика соответствует процессу нагревания жидкости (см: g). Согласно закону сохранения энергии, отвердевание данной жидкости происходит при той же температуре, при которой твердое тело плавится (h).

Так как для аморфных тел отсутствует определенная температура плавления и отвердевания, то их графики зависимости температуры от времени для процесса плавления и отвердевания отличаются от соответствующих графиков кристаллических тел (i).

• Количество теплоты, необходимое для перехода тела из *твдого* состояния в жидкое при температуре плавления, называется **теплотой плавления**.



Чтобы перевести одинаковые массы разных веществ, нагретых до их температур плавления, в жидкое состояние, необходимо сообщить каждому из них различное количество теплоты.

• **Удельная теплота плавления** – это физическая величина, показывающая, какое количество теплоты необходимо сообщить 1 кг кристаллического вещества, чтобы перевести его из твердого состояния в жидкое при температуре плавления:

$$\lambda = \frac{Q}{m}. \quad (6.42)$$

$\lambda$  – удельная теплота плавления данного вещества. Единица удельной теплоты плавления в СИ:  $[\lambda] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ .

Согласно закону сохранения энергии, полученное телом количество теплоты во время плавления равно количеству теплоты, выделяемому при отвердевании этого тела. Иногда твердые тела, минуя жидкое состояние, сразу переходят в газообразное или наоборот, происходит процесс превращения из газообразного состояния сразу в твердое:

• Процесс перехода твердого тела, минуя жидкое состояние, в газообразное состояние называется **сублимацией** (испарение твердого тела), а обратный процесс перехода газообразного вещества, минуя жидкое состояние, в твердое называется **десублимацией**.

#### Исследование-2. Применение. Сублимация и десублимация

**Оборудование:** герметичная колба с кристаллами йода внутри, спиртовка.

**Ход исследования:**

1. Нагрейте колбу на спиртовке и наблюдайте за произошедшим явлением (j).
2. Загасив спиртовку, дайте колбе остыть и проследите за явлением произошедшим внутри нее.

**Обсуждение результатов:**

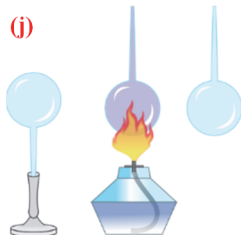
- Что наблюдалось при нагревании и охлаждении колбы?
- Какие явления вы наблюдали?

**Применение в повседневной жизни:** Наверно, вы наблюдали такие явления, как уменьшение с течением времени на ветках деревьев зимой инея, высыхание замершей мокрой одежды.

- Какие физические процессы происходят при этих явлениях?

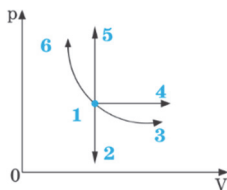
**Провести самооценку:**

1. Какие понятия повторили на уроке?
- Что из этого вы хорошо поняли, а что осталось вам не ясным?
2. Сравните кристаллические и аморфные тела по диаграмме Венна.
3. Что означает дальний и близкий порядок частиц?
4. По каким свойствам отличаются друг от друга моно- и поликристаллы?
5. Что общего между процессами плавления и отвердевания?
6. Что такое удельная теплота плавления?
7. Приведите примеры явления сублимации и десублимации.

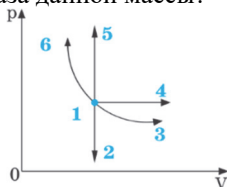


**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Запишите в рабочем листке нижеприведенные определения, понятия и формулы: “кристаллическое тело”, “аморфное тело”, “монокристалл”, “поликристалл”, “изотропность”, “анизотропность”, “плавление”, “отвердевание”, “температура плавления”, “удельная теплота плавления”, “сублимация”, “десублимация”.

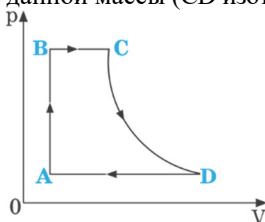
- 6.1. Воздушный шар наполнен водородом массой 4 г. Определите число молекул водорода в шаре.
- 6.2. Какое количество вещества имеется в “сухом льде” ( $CO_2$ ) массой 220 г?
- 6.3. Молярная масса водорода и кислорода, соответственно,  $M_{H_2} = 2 \cdot 10^{-3}$  кг/моль и  $M_{O_2} = 3,2 \cdot 10^{-2}$  кг/моль. Определите массу молекул этих газов.
- 6.4. Определите молярную массу и массу одной молекулы сульфата меди ( $CuSO_4$ ).
- 6.5. Определите концентрацию молекул газообразного кислорода при давлении  $2 \cdot 10^5$  Па. Средняя квадратичная скорость молекул  $700 \frac{м}{с}$ .
- 6.6. Определите среднюю кинетическую энергию поступательного движения молекул кислорода при нормальных условиях, если концентрация его молекул  $2,7 \cdot 10^{25} м^{-3}$ .
- 6.7. Газ, как система, в первом случае находится в закрытом теплоизолированном сосуде, а во втором случае в металлическом сосуде. Можно ли считать эти системы замкнутыми и изолированными?
- 6.8. Две чайные ложки одинакового размера, изготовленные из разных металлов, находятся в холодильнике в тепловом равновесии. Можно ли предположить, что извлеченные из холодильника в комнату ложки сразу придут в тепловое равновесие? Может ли в комнате между этими телами возникнуть тепловое равновесие?
- 6.9. Рассмотрим систему вода-лед: кусок льда помещается в воду с температурой  $15^\circ C$ . Во время таяния льда опущенный в воду термометр показывает  $10^\circ C$ . Можно ли утверждать, что “температура системы  $10^\circ C$ ”?
- 6.10. Температура вещества на глубине 100 км от поверхности Земли 1200 К. Чему равна эта температура по шкале Цельсия?
- 6.11. Критическая температура водяного пара 647 К. При какой температуре вода будет только в газообразном состоянии?
- 6.12. В каком агрегатном состоянии будет кислород при температурах 150 К и 190 К? Критическая температура кислорода 154 К.
- 6.13. Какие участки диаграммы соответствуют изотермическому сжатию и изотермическому расширению идеального газа данной массы?



- 6.14. Какие участки диаграммы соответствуют изохорному охлаждению и изохорному нагреванию идеального газа данной массы?



- 6.15. Какой участок диаграммы соответствует состоянию уменьшения температуры идеального газа данной массы (CD изотерма)?



- 6.16. В сосуде имеется 8 г кислорода при давлении  $10^5 \text{ Па}$  и температуре 300 К. Вычислите объем газа: ( $M = 32 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$ ,  $R = 8 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ )
- 6.17. При увеличении абсолютной температуры газа в 6 раз при постоянном давлении его объем стал равен  $18 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ . Вычислите первоначальный объем газа.
- 6.18. Давление идеального газа данной массы увеличилась в 2,8 раза, а объем уменьшился в 4 раза. Как изменилась абсолютная температура газа?
- 6.19. Определите плотность воздуха при температуре  $17^\circ \text{C}$  и давлении  $3 \cdot 10^5 \text{ Па}$   
 $(M_{\text{воздуха}} = 29 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}, R = 8 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}})$ .
- 6.20. Концентрация водяного пара в воздухе при температуре  $27^\circ \text{C}$  равна  $2 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ . Каково давление водяного пара при этой температуре ( $k = 1,4 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ )?
- 6.21. Плотность водяного пара в воздухе при температуре  $15^\circ \text{C}$  равна  $9,1 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$ , а относительная влажность 70%. Какова плотность насыщенного водяного пара при этой температуре?
- 6.22. Какое количество теплоты выделится при конденсации 200 г паров спирта при постоянной температуре ( $L = 9 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ )?
- 6.23. В капиллярной трубке какого радиуса ртуть спустится на 30 см  
 $(\sigma = 510 \frac{\text{Н}}{\text{м}}, \rho = 13,6 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, g = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2})$ ?
- 6.24. Определите объем поднявшейся воды в капиллярной трубке радиусом 0,25 мм  
 $(\sigma = 72 \frac{\text{Н}}{\text{м}}, \rho = 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, g = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}, \pi = 3)$
- 6.25. Водяная капля падает из вертикально расположенной трубки диаметром 2 мм. Определите массу водяной капли ( $\sigma_{\text{вода}} = 73 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ ).
- 6.26. Масса 76 капель минерального масла, капающих из пипетки, равна 910 мг. Внутренний радиус пипетки 1,2 мм. Определите коэффициент поверхностного натяжения масла.
- 6.27. Чем определяется анизотропия монокристалла?
- 6.28. Какими внешними признаками можно различать монокристаллы?

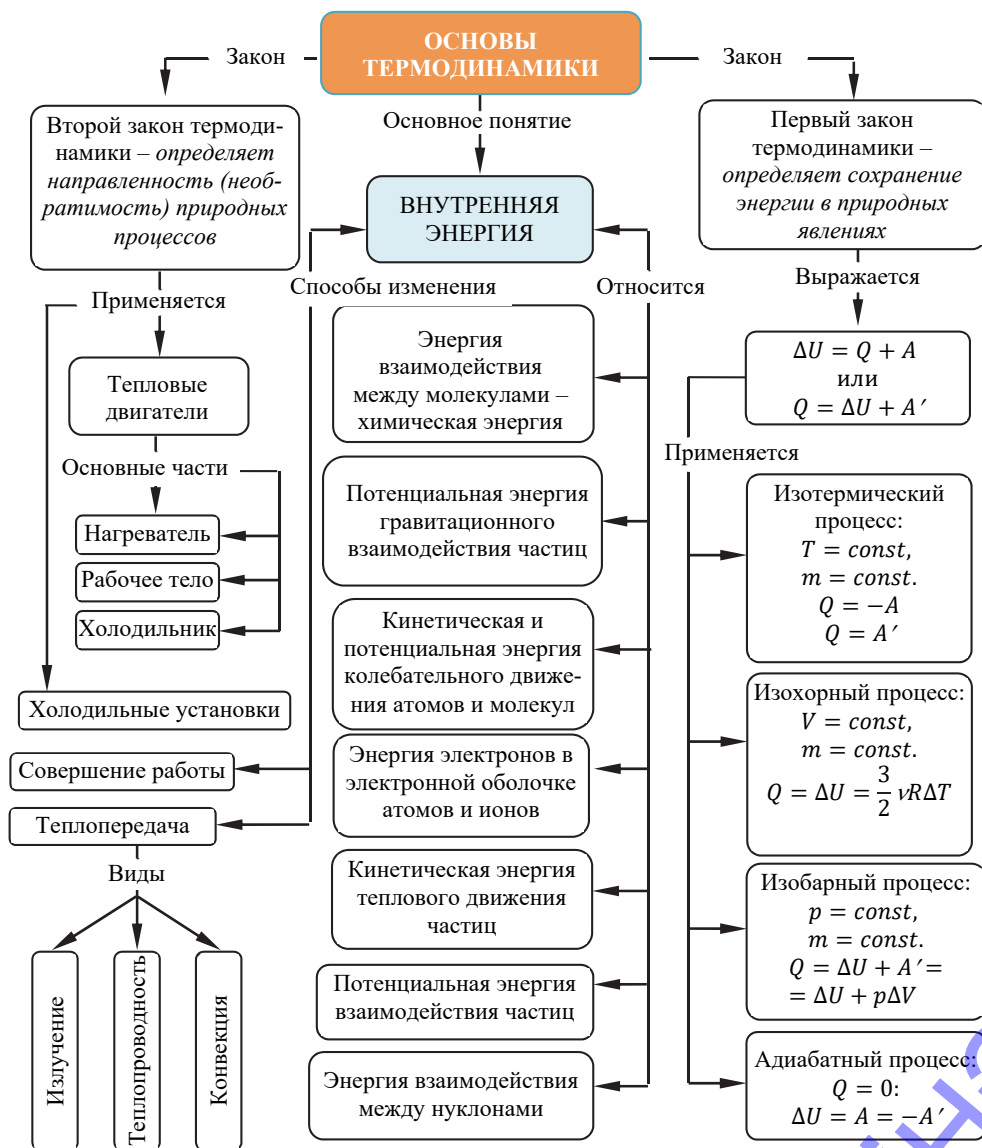
# ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

Освоив материалы этой главы –  
**ВЫ СУМЕЕТЕ:**

- отличить термодинамическую систему от всех других физических систем по ее свойствам
- комментировать внутреннюю энергию как функцию состояния термодинамической системы;
- демонстрировать экспериментально способы изменения внутренней энергии;
- комментировать первый закон термодинамики и объяснить получаемые из него результаты;
- объяснить необратимость теплового процесса, комментировать физический смысл второго закона термодинамики;
- объяснить принцип работы тепловых двигателей и холодильных установок;
- комментировать заслуги ученых в создании и развитии тепловой физики;
- определять связь между физическими величинами, характеризующими термодинамические процессы;
- составлять и решать задачи различного характера с применением тепловых явлений.

ЛАЙН

## “Карта понятий” для VII главы





## 7.1 ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА. ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ

Дополните предложения, используя данные ключевые слова (ключевые слова можно использовать несколько раз; окончания предложений завершите соответствующим суффиксом), на основании известных знаний (см.: Физика-8, стр. 20-26).

*С ростом ... тела, его ... увеличивается, так как увеличивается ... движения молекул и атомов, из которых состоит тело. Это означает, что также увеличивается ... молекул этого тела. С понижением ... тела его ... уменьшается. При совершении ... над телом или при ... тела его ... изменяется – увеличивается.*

Ключевые слова:

- скорость
- механическая работа
- температура
- излучение
- атом и молекула
- средняя кинетическая энергия
- внутренняя энергия

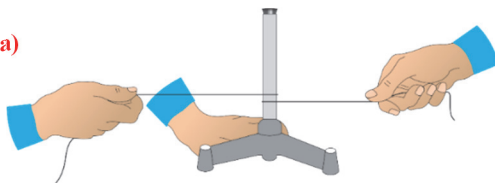
- Что подразумевают под выражением “внутренняя энергия тела”?
- Какими способами можно изменить внутреннюю энергию тела?
- Как изменится внутренняя энергия тела, например газа, при действии на него внешних сил, под действием которых он сжимается или расширяется?

### Исследование-1. За счет чего изменилась внутренняя энергия системы?

**Оборудование:** тонкостенная бронзовая трубка, запаянная с одного конца, пробка, эфирный спирт, шнурок, подставка для штатива.

**Ход исследования:**

1. Налейте в закрепленную на подставке трубку 3-4 см<sup>3</sup> спирта. Подождав 1-2 минуты, плотно закройте пробкой открытый конец трубки.
2. Оберните один раз шнурок вокруг трубки и, взявшись за его концы, (а) тяните то в одну, то в другую сторону, создавая скольжение шнура по поверхности трубки (а). Продолжайте этот процесс до возникновения “необычного” явления в системе.



**Обсуждение результатов:**

- Какое “необычное” явление наблюдалось в системе при непрерывном трении шнура о поверхность трубки? Как можно объяснить причину возникновения этого явления?
- Какова связь этого явления с изменением внутренней энергии системы?

**Термодинамическая система.** Раздел физики, изучающий тепловые явления в макроскопических системах, называется *термодинамикой*. В основе термодинамики лежат термодинамические законы, опирающиеся на большое количество экспериментальных фактов. Эти законы отвечают на вопрос “как?”, например, как изменяется состояние тела (твердого тела, жидкости или газа) при нагревании (или охлаждении), в каком направлении и как передается тепло, как изменяется температура газа при его расширении и другие. Объектами исследования термодинамики являются *термодинамические системы*.

• Любое макроскопическое тело или система макроскопических тел называется *термодинамической системой*. Состояние термодинамической системы характеризуется макроскопическими или термодинамическими параметрами (масса, плотность, объем, давление, температура).

**Внутренняя энергия.** Величины, определяющие состояние термодинамической системы в данный момент времени, то есть соответствующие этому состоянию макроскопические параметры, называются *функциями состояния*. Основной среди этих величин является *внутренняя энергия*.

• **Внутренняя энергия** – это сумма кинетических энергий различных видов, движения частиц системы и потенциальных энергий взаимодействия этих частиц (см.: таблица 7.1).

Таблица 7.1.



Внутренняя энергия термодинамической системы является функцией температуры и объема, определяющих состояние системы:  $U(T, V)$ .

**Внутренняя энергия одноатомного идеального газа.** Газ, молекулы которого состоят из одного атома, называют *одноатомным газом*. Внутренняя энергия одноатомного газа равна сумме кинетических энергий поступательного движения частиц и потенциальных энергий их взаимодействия:

$$U = N \cdot \bar{E}_k + E_p \quad (N - \text{число частиц газа}).$$

Однако внутренняя энергия идеального газа данной массы равна сумме средних кинетических энергий хаотического движения частиц:

$$U = N \cdot \bar{E}_k.$$

Средняя кинетическая энергия одной частицы одноатомного идеального газа определяется выражением  $\bar{E}_k = \frac{3}{2}kT$ , следовательно, внутренняя энергия такого газа зависит только от температуры:

$$U = \frac{3}{2}N \cdot kT = \frac{3}{2} \nu N_A \cdot kT = \frac{3}{2} \nu \cdot RT = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT. \quad (7.1)$$

Это выражение является формулой закона Джоуля:

• **Внутренняя энергия идеального газа зависит от ее массы, рода (молярной массы) и температуры.** Даже если давление и объем газа изменятся, при постоянной температуре его внутренняя энергия не изменится.

Сопоставив формулу (7.1) с выражением Менделеева-Клапейрона, получим:

$$U = \frac{3}{2}pV. \quad (7.2)$$

**Способы изменения внутренней энергии.** Для изменения внутренней энергии термодинамической системы необходимо изменить или среднюю кинетическую энергию теплового движения молекул системы, или потенциальную энергию их взаимодействия, или же изменить обе энергии одновременно. Из многочисленных опытов было определено, что существует два способа изменения внутренней энергии: *теплопередача и совершение работы* (см.: *Физика-8, стр.23*).

• *Изменение внутренней энергии системы происходит двумя способами: передачей количества теплоты  $Q$  и совершением работы  $A$ .*

$$\Delta U = Q + A. \quad (7.3)$$

Если внутренняя энергия изменяется только в результате теплообмена, то изменение внутренней энергии равно полученному (или отданному) системой количеству теплоты. Например, при нагревании и охлаждении тела изменение его внутренней энергии определяется так:

$$\Delta U = Q = cm(T_2 - T_1) = cm\Delta T \quad (7.4)$$

Изменение внутренней энергии в процессе плавления твердого тела или кристаллизации жидкости происходит за счет изменения потенциальной энергии взаимодействия молекул тела. Изменение внутренней энергии при этих процессах численно равно теплоте плавления (кристаллизации):

$$\Delta U = Q_{\text{пл}} = \lambda m. \quad (7.5)$$

Где  $\lambda$  – удельная теплота плавления.

Изменение внутренней энергии тела в процессе парообразования и конденсации также равно затраченному во время этого процесса количеству теплоты:

$$\Delta U = Q_{\text{пар}} = Lm. \quad (7.6)$$

Где  $L$  – удельная теплота парообразования.

*Изменение внутренней энергии одноатомного идеального газа определяется изменением его температуры:*

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{3}{2} \nu \cdot R(T_2 - T_1) = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R(T_2 - T_1) = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R\Delta T. \quad (7.7)$$

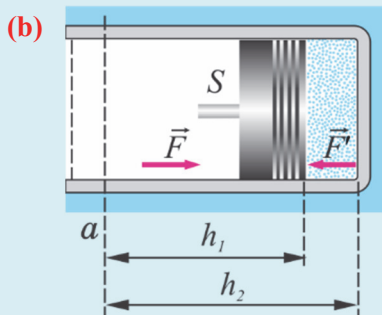
Где  $U_1$  и  $U_2$  – соответственно, значения внутренней энергии одноатомного газа в начальном и конечном состояниях.

**Внимание.** *Изменение внутренней энергии термодинамической системы зависит не от вида процесса, а от его начального и конечного состояния.*

**Работа в термодинамике.** *Если изменение внутренней энергии происходит только в результате совершения механической работы, то это изменение равно или работе внешних сил над системой ( $A$ ), или работе системы против внешних сил ( $A'$ ):*

$$\Delta U = A = -A'. \quad (7.8)$$

- *Работа в термодинамике – это одна из мер изменения внутренней энергии термодинамической системы.*



**Работа газа.** Предположим, что в толстостенном цилиндре находится газ, сжимаемый поршнем. При сжатии поршень передает часть своей кинетической энергии молекулам газа, в результате чего увеличивается внутренняя энергия газа и повышается его температура – внешние силы совершают работу над газом. При расширении, наоборот, молекулы газа, передавая часть своей кинетической энергии поршню, уменьшают свою скорость и газ охлаждается – он совершает работу над внешними силами (b).

Таким образом, работа, совершенная газом над внешними силами, в результате расширения газа данной массы при постоянном давлении равна:

$$A' = F \cdot \Delta h = pS \cdot (h_2 - h_1) = p(Sh_2 - Sh_1)$$

или

$$A' = p(V_2 - V_1) = p\Delta V. \quad (7.9)$$

Работа же, совершенная внешними силами над газом равна :

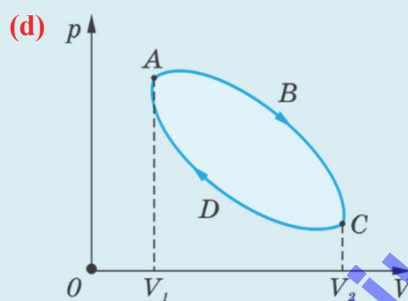
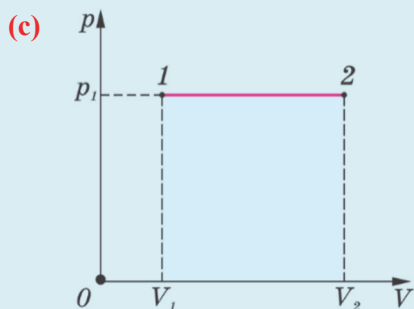
$$A = -A' = -p(V_2 - V_1) = p(V_1 - V_2) = -p\Delta V. \quad (7.10)$$

Где  $\vec{F} = pS$  – сила, с которой газ действует на поршень,  $\Delta h$  – смещение поршня,  $p$  – давление газа,  $S$  – площадь поперечного сечения цилиндра,  $\Delta V$  – изменение объема газа.

Совершенная работа численно равна площади фигуры, образованная графиком в системе координат  $p - V$ : при расширении газа (т.е. при увеличении объема газа)  $A' > 0$  или  $A < 0$ ; при сжатии же газа (т.е. при уменьшении объема газа)  $A' < 0$  или  $A > 0$  (c).

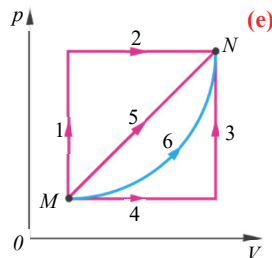
Если в процессе совершения работы газ через некоторое время возвращается в первоначальное состояние, то такой процесс называется замкнутым или циклическим процессом.

Если стрелки, показывающие направление циклического процесса, совпадают с направлением вращения часовых стрелок, то работа газа положительна, а работа внешних сил отрицательна (d). Если же стрелки, определяющие направление процесса, направлены против вращения часовых стрелок, то работа газа отрицательна, а работа внешних сил положительна.



### Исследование-1. Применение. В каком процессе внутренняя энергия меняется гораздо больше?

**Задача:** В термодинамической системе были совершены процессы, представленные на диаграмме  $p - V$  (е). Сравните изменение внутренней энергии и работы, совершаемых системой в процессах перехода из точки М в точку N.



#### Обсуждение результатов:

- От чего зависит изменение внутренней энергии термодинамической системы?
- В каком из процессов внутренняя энергия системы изменяется гораздо больше? Почему?
- В каком из процессов работа, совершаемая системой, гораздо больше? Почему?

#### Применение в повседневной жизни:

Ширина классной комнаты 5 м, длина – 10 м, а высота – 4 м. Температура воздуха в комнате при нормальном атмосферном давлении 20°C.

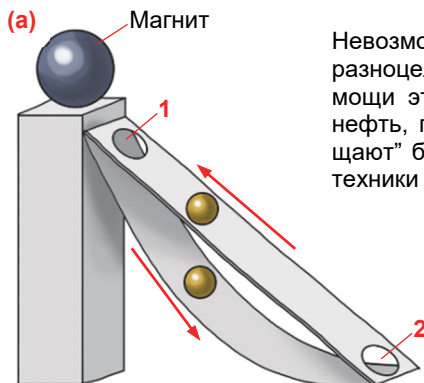
- Чему будет равна внутренняя энергия воздуха в комнате, если он состоит только из одноатомного идеального газа?
- На какой высоте потенциальная энергия автомобиля массой 2 тонны будет равна внутренней энергии воздуха в классной комнате ( $g = 10 \text{ м/с}^2$ )?

#### Провести самооценку:

1. Какие понятия повторили на уроке? Что из этого вы хорошо поняли, а что осталось вам не ясным?
2. Какие макропараметры определяют внутреннюю энергию тела?
3. От каких макропараметров зависит внутренняя энергия одноатомного идеального газа?
4. Чему равно изменение внутренней энергии термодинамической системы, если в ней происходит только теплообмен?
5. Почему совершаемая механическая работа может изменить внутреннюю энергию системы?
6. Какие макропараметры термодинамической системы изменяются в процессе совершения работы?
7. Почему работа, совершенная газом, и работа, совершаемая внешними силами над газом, отличаются друг от друга знаком?

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Запишите в рабочем листке определения нижеприведенных понятий и положений: “термодинамика”, “термодинамическая система”, “внутренняя энергия”, “внутренняя энергия идеального газа данной массы”, “способы изменения внутренней энергии”, “работа в термодинамике”.

## 7.2 ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ



Невозможно представить себе повседневную жизнь без разноцелевой техники, облегчающей нашу жизнь. При помощи этой техники люди вспахивают землю, добывают нефть, газ, руду и другие полезные ископаемые, “сокращают” большие расстояния и т.д. Главное свойство всей техники – способность совершения ими работы.

По этой причине еще с древних времен люди пытались создать способный работать вечно *perpetuum mobile*, то есть вечный двигатель. Как одну из интересных работ в этом направлении можно показать оригинальный проект, предложенный английским священником Джоном Уилкенсином в XVII веке, основанный на действии магнитного поля.

По идее проекта, вечный двигатель должен работать так: шарообразный магнит помещен на высокую опору, к которой прикрепляются две наклонные плоскости, верхняя плоскость прямолинейная, а нижняя изогнутая (a).

В результате притяжения магнитом шарик, помещенный в нижней части прямой плоскости, начинает подниматься вверх и проваливается на нижнюю плоскость через отверстие 1 в верхней части плоскости. Затем, скатываясь вниз по изогнутой плоскости, снова попадает на прямую плоскость через отверстие 2, и всё повторяется снова. е

- Будет ли вечно работать этот “двигатель”? Почему?
- Какой фундаментальный закон должен выполняться для работы двигателя?

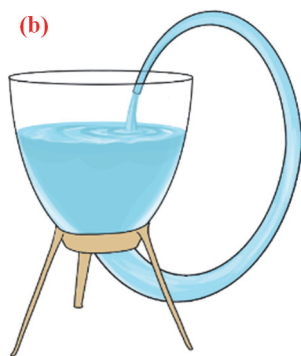
**Исследование-1.** Может ли непрерывно совершаться работа, без получения энергии со стороны?

**Мысленный эксперимент.** Французский изобретатель Денни Папен (1647–1712) предложил проект простой гидравлической машины, способной работать вечно. По проекту к нижней части широкого сосуда припаивается изогнутая трубка такой формы, что открытый конец трубки малого диаметра помещается над верхней частью широкого сосуда (b).

По предположению изобретателя, так как вес воды в широкой части сосуда больше, чем вес воды в узкой части, то возникающая разность давлений создаст вечное движение воды к узкому концу трубки. Этот *perpetuum mobile* Папена не заработал.

**Обсуждение результатов:**

- В чем ошибка изобретателя? Какой закон не был принят во внимание в этом двигателе?
- Как можно обеспечить непрерывную механическую работу?



**Первый закон термодинамики.** Согласно одному из фундаментальных законов природы – закону сохранения энергии, полная энергия (механическая и внутренняя энергия) замкнутой системы остается постоянной при всех процессах, происходящих внутри этой системы:

$$E + U = \text{const.}$$

Закон сохранения энергии, применяемый к тепловым процессам, называют *первым законом термодинамики*:

- *Изменение внутренней энергии термодинамической системы равно количеству теплоты, переданному этой системе, и работе внешних сил, совершенной над системой:*

$$\Delta U = Q + A \quad (7.11)$$

Над замкнутой и изолированной системой внешние силы не совершают работу ( $A = 0$ ) и не происходит теплообмена с окружающими телами ( $Q = 0$ ). В этом случае, согласно первому закону термодинамики, внутренняя энергия замкнутой и изолированной системы не изменяется:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = 0 \rightarrow U_2 = U_1$$

Так как работа, совершаемая системой над внешними силами, равна работе, совершаемой внешними силами над системой с противоположным знаком:  $A = -A'$ , то первый закон термодинамики можно записать так:

- *Количество теплоты, сообщенное термодинамической системе, затрачивается на изменение ее внутренней энергии и работу, которую система совершает против внешних сил:*

$$Q = \Delta U + A' \quad (7.12)$$

После открытия закона сохранения энергии стала очевидной невозможность создания вечного двигателя первого рода:

- *Вечный двигатель первого рода (perpetuum mobile I) – это двигатель, который будучи однажды приведен в действие и не получая энергию извне, совершает работу вечно.*

Согласно выражению (7.11), для совершения работы система или должна получать энергию извне, или использовать свою внутреннюю энергию:

$$A' = Q - \Delta U \quad (7.13)$$

В противном случае, то есть если  $Q = 0$  и  $\Delta U = 0$ , то и работа  $A' = 0$ , а это означает, что работающий вечный двигатель невозможен.

## Применение первого закона термодинамики к разным процессам.

### 1. Изотермический процесс ( $m = \text{const}$ , $T = \text{const}$ ).

Так как в этом процессе температура системы остается постоянной, то и ее внутренняя энергия остается постоянной, изменение же внутренней энергии равно нулю:

$$U = \text{const} \rightarrow \Delta U = 0.$$

Из выражений первого закона термодинамики (7.11) и (7.12) получаем:

$$Q = A' \quad (7.14)$$

$$Q = -A \quad (7.15)$$

- *При изотермическом процессе все количество теплоты, переданное системе, затрачивается на совершение работы.*

### 2. Изохорный процесс ( $m = \text{const}$ , $V = \text{const}$ ).

Так как в этом процессе объем системы остается постоянным, то из выражения (7.10) следует, что работа не совершается ( $A = 0, A' = 0$ ). Первый закон термодинамики приобретает вид:

$$Q = \Delta U \quad (7.16)$$



Для одноатомного идеального газа:

$$Q = \Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R \Delta T \quad (7.17)$$

- При изохорном процессе количество теплоты, переданное системе, целиком затрачивается на изменение внутренней энергии.

**Удельная теплоемкость одноатомного идеального газа, при постоянном объеме.** Если в выражении (7.17) учесть выражения внутренней энергии одноатомного идеального газа (7.7) и количества теплоты (7.4), то получим формулу для удельной теплоемкости при постоянном объеме:

$$c_V = \frac{3}{2} \frac{R}{M} \quad (7.18)$$

### 3. Изобарный процесс ( $m = \text{const}$ , $p = \text{const}$ ).

В этом процессе давление системы остается постоянным, а температура и объем изменяются. Для этого процесса первый закон термодинамики записывается, так:

$$Q = \Delta U + A' = \Delta U + p \Delta V. \quad (7.19)$$

- При изобарном процессе (расширении) переданное системе количество теплоты затрачивается на увеличение его внутренней энергии и на совершение газом работы против внешних сил.

**Удельная теплоемкость одноатомного идеального газа при постоянном давлении:** Приняв в (7.19) во внимание выражения для одноатомного идеального газа:

$$\begin{cases} A' = p \Delta V = \frac{m}{M} R \Delta T, \\ \Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R \Delta T \end{cases} \quad (7.20)$$

получим:

$$Q = \frac{5}{2} \frac{m}{M} R \Delta T. \quad (7.21)$$

С учетом этих выражений можно определить удельную теплоемкость одноатомного идеального газа при постоянном давлении как:

$$c_p = \frac{5}{2} \frac{R}{M} = c_V + \frac{R}{M}. \quad (7.22)$$

Из сравнения выражений (7.20) и (7.21) видно, что при изобарном процессе для одноатомного идеального газа существуют следующие соотношения между переданным количеством теплоты, изменением внутренней энергии и совершенной работой:

$$\Delta U = 0,6 Q, \quad (7.23)$$

$$\Delta U = 1,5 A', \quad (7.24)$$

$$A' = 0,4 Q. \quad (7.25)$$

### 4. Адиабатный процесс ( $m = \text{const}$ , $Q = 0$ ).

- **Адиабатный процесс** – это процесс, происходящий без теплообмена системы с окружающей средой.

Так как в этом процессе отсутствует теплообмен системы со сторонними телами, то первый закон термодинамики можно записать так:

$$\Delta U = -A'$$

или

$$\Delta U = A \quad (7.26)$$

При адиабатном расширении газа его температура и внутренняя энергия уменьшаются, то есть газ охлаждается, а при адиабатном же сжатии, наоборот, его температура и внутренняя энергия увеличиваются, то есть газ нагревается.

#### Исследование-2. Применение. На сколько изменилась внутренняя энергия?

**Задача:** Одноатомный идеальный газ при давлении  $2 \cdot 10^5$  Па, изобарно расширяясь, увеличил объем на  $\Delta V = 0,5 \text{ м}^3$ . Определите изменение внутренней энергии и полученное количество теплоты при этом процессе.

#### Обсуждение результатов:

- Чему равно изменение внутренней энергии одноатомного идеального газа при его изобарном расширении?
- Как определяется количество теплоты, полученное идеальным газом в этом процессе?

#### Применение в повседневной жизни:

Наверное, вам приходилось наблюдать за проливным дождем и выпадением града в летнее время. Как это происходит?

Нагретый у поверхности Земли воздух, поднимаясь с большой скоростью в верхние слои атмосферы, расширяется и в результате резко охлаждается. Водяной пар в них, конденсируясь в маленькие капельки воды и отвердевая в кристаллики льда, образует «тяжелые» облака, которые затем проливаются в виде проливных дождей или выпадения града над некоторыми областями Земли.

- В результате какого процесса над воздухом (газом) происходит описанное атмосферное явление?

#### Провести самооценку:

1. Какие понятия повторили на уроке? Что из этого вы хорошо поняли, а что осталось вам не ясным?
2. Выражением какого фундаментального природного закона является первый закон термодинамики?
3. Какой важный вывод можно сделать из первого закона термодинамики?
4. Почему при изохорном процессе количество теплоты, переданное газу, полностью затрачивается на изменение его внутренней энергии?
5. Почему при изотермическом процессе количество теплоты, переданное газу, равно совершенной работе?
6. За счет чего в процессе адиабатного расширения газа совершается механическая работа?
7. За счет чего при адиабатном сжатии совершается механическая работа?

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Запишите в рабочем листке определения нижеприведенных понятий и положений: “первый закон термодинамики”, “первый закон термодинамики для изотермического процесса”, “первый закон термодинамики для изобарного процесса”, “первый закон термодинамики для изохорного процесса”, “адиабатный процесс”, “вечный двигатель первого рода”.

Иногда можно встретить такие механические явления, в которых процесс протекает одинаково как в прямом, так и в обратном направлении. Например, сняв на видео повторяющиеся колебательные движения математического или пружинного маятника, происходящие за небольшой промежуток времени, и продемонстрировав явление в обратном направлении, можно увидеть, что колебания, происходящие в обратном направлении, в точности повторяют колебания, происходящие в прямом направлении.

- Как можно назвать такие одинаково протекающие явления? В какой степени важно направление процесса для этих явлений?
- Выполняется ли закон сохранения энергии для этих явлений? Ответ обосновать.

Однако все естественные явления, происходящие в природе, можно сказать, односторонние; например, рост растений, падение массы воды в водопаде, старение человека и другие. Также имеется определенная направленность явлений в повседневной жизни, в которых мы участвуем; например, мяч после удара футболиста сначала ускоряется, а затем, замедляясь, останавливается; или падающий с высоты камень, ударившись о землю, останавливается, кипящая вода в чайнике, оставленном без внимания на кухне, полностью превращается в пар и др.

- Возможно ли самопроизвольное течение всех этих процессов в обратном направлении? Например, могут ли самопроизвольно протекать процессы: поднятие дождевых капель с поверхности Земли наверх в небо, подъем камня с земли на высоту, ускорение мяча из состояния покоя в направлении футболиста, “течение” водопада снизу вверх, омоложение старого человека и другие?
- Как можно назвать процессы, протекающие только в одном направлении?

Выполняется ли для них первый закон термодинамики?

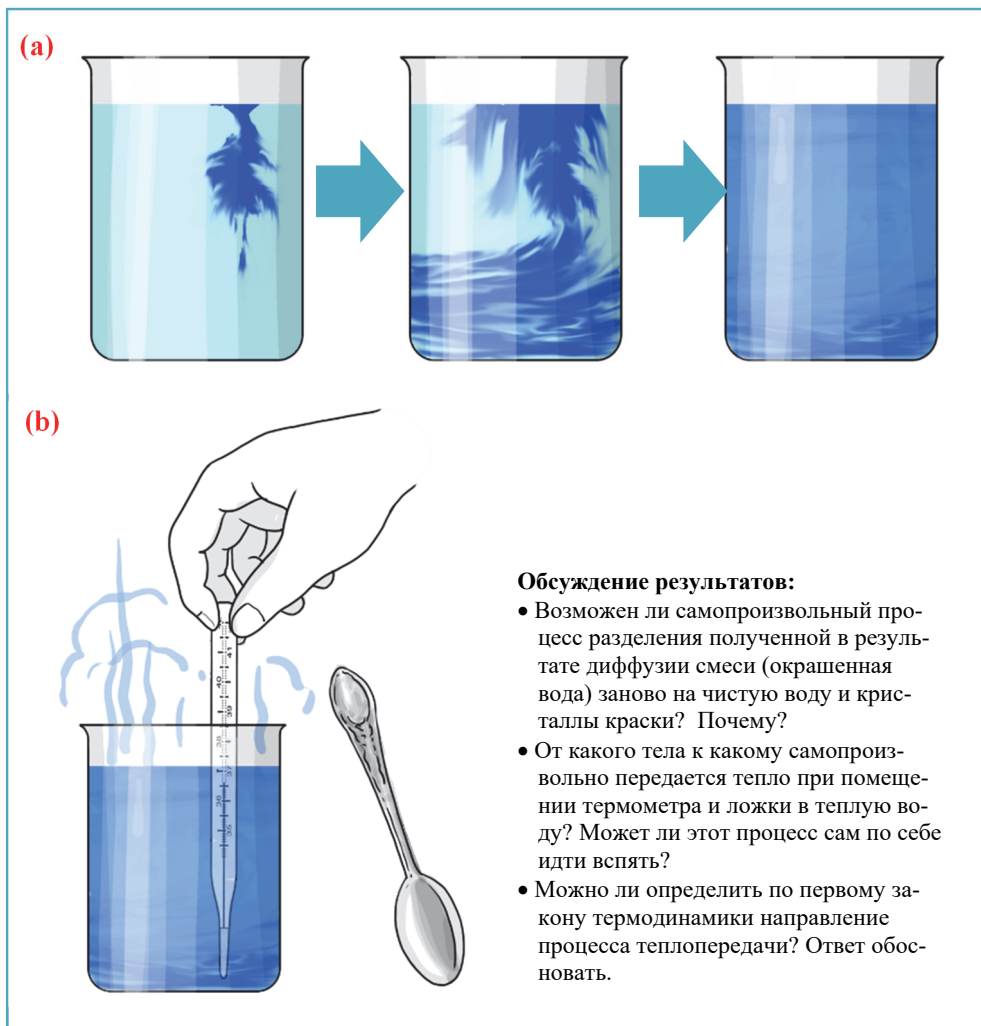
#### **Исследование-1. К какому выводу можно прийти из наблюдаемых явлений?**

**Оборудование:** водонагреватель, лабораторный стакан (2 шт.), кристаллы краски, металлическая ложка, термометр.

**Ход исследования:**

**Опыт 1.** Наполните стакан теплой водой. Бросив кристаллы краски в воду, проследите за ходом диффузии, то есть за окрашиванием воды по всему объему (**a**).

**Опыт 2.** Налейте во второй стакан теплой воды, измерьте термометром ее температуру. Через минуту поместите металлическую ложку, имеющую комнатную температуру, в воду (**b**). Пронаблюдайте достижение теплового равновесия, возникшее в системе.



**Второй закон термодинамики.** Первый закон термодинамики – это закон сохранения энергии для тепловых процессов. Этот закон подтверждает невозможность создания вечного двигателя первого рода. Однако этот закон не определяет, в каком направлении протекают тепловые процессы. Например, приведем в соприкосновение друг с другом два тела с разными температурами. Через некоторый промежуток времени между ними установится тепловое равновесие, то есть выполняется первый закон термодинамики – какое количество теплоты отдаст более горячее тело, такое же количество теплоты получит более холодное тело. Если бы этот процесс произошел наоборот, то есть холодное тело самопроизвольно (без внешнего вмешательства) передало бы количество теплоты горячему телу, то первый закон термодинамики также бы выполнялся. Однако ни один из экспериментов, проводимых учеными в течение веков, не установил протекание этого процесса самопроизвольно.

Другими словами, процесс теплопередачи в термодинамической системе, имеющий конечное значение разности изменения температур, *необратим*. Эта идея, сформулированная немецким ученым Р.Клаузиусом (1822–1888) в 1850 году, лежит в основе *второго закона термодинамики*:

• *Невозможен процесс, результатом которого является только самопроизвольный переход количества теплоты от холодного тела к теплomu. Тепловая энергия самопроизвольно может передаваться только в направлении теплового равновесия, то есть от теплого тела к холодному.*

Второй закон термодинамики определяет закономерность направления термодинамического процесса. Он показывает, что процесс передачи тепла от холодного тела к теплomu не может протекать самопроизвольно, этот процесс можно реализовать в результате совершения работы.

В дальнейших исследованиях было определено, что не только тепловые процессы, но и вообще, все естественные процессы, происходящие в природе, *необратимы*.

• **Необратимый процесс** – это процесс, самопроизвольное протекание которого в противоположном направлении невозможно.

**Принцип работы теплового двигателя.** Принцип работы тепловых машин основан на применении второго закона термодинамики и составляет его научную основу.

• **Тепловая машина** – это термодинамическая система, выполняющая циклический процесс (совершающая механическую работу), передавая количество теплоты от одного тела другому.

Тепловые машины бывают двух видов: *тепловые двигатели и холодильные установки*.

• **Тепловым двигателем** называется установка, преобразующая внутреннюю энергию различного вида топлива в механическую энергию.

Независимо от особенностей строения, все тепловые двигатели состоят из трех основных частей (см.: физика-8, стр.90-92):

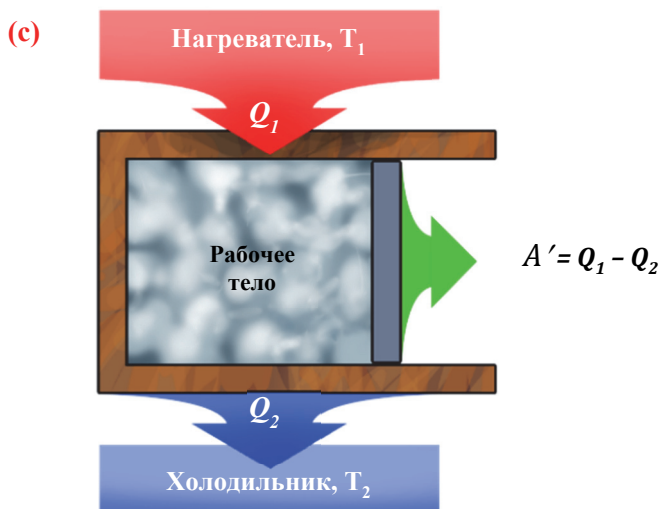
1. *Нагреватель* – это часть двигателя, сохраняющая постоянную высокую температуру  $T_1$ , достигаемую за счет сгорания разных видов топлива или в результате выделения энергии в ядерных реакциях.

2. *Рабочее тело* – это газ или пар, совершающий механическую работу в результате расширения-сжатия.

3. *Холодильник* – это часть двигателя с температурой  $T_2$  ( $T_2 < T_1$ ): окружающая среда (атмосфера), вода.

Принципиальная схема работы теплового двигателя следующая: рабочее тело получает от нагревателя количество теплоты  $Q_1$ , отдает холодильнику количество теплоты  $Q_2$  и за один цикл совершается полезная работа  $A'(\text{е})$ :

$$A' = Q_1 - Q_2. \quad (7.27)$$



Для непрерывной работы теплового двигателя процесс, происходящий в двигателе, должен быть циклическим. С этой целью двигатель регулируется, так, чтобы рабочее тело (газ), вначале расширившись после получения количества теплоты, толкает поршень в цилиндре и совершает работу над ним, а затем, сжимаясь, возвращается в первоначальное состояние. После этого газ снова расширяется, и процесс циклически повторяется (трение подвижных частей двигателя и теплообмен с окружающей средой сводится до минимума) (см.: с).

В 1851 году английский ученый Уильям (Кельвин) Томсон (1824–1907), изучив принцип работы теплового двигателя, дал новое прочтение *II закона термодинамики*:

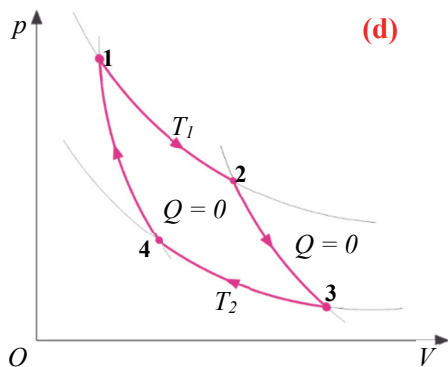
• *Тепловой двигатель, выполняющий циклический процесс, без холодильника работать не может.*

Действительно, количество теплоты  $Q_1$ , полученное от нагревателя, затрачивается на совершение полезной работы в двигателе не полностью, на это уходит только его определенная часть, остальная же его часть – количество теплоты  $Q_2$ , передается холодильнику. Характеристика, определяющая, какая часть количества теплоты, полученного от нагревателя, затрачивается на совершение полезной работы, называется *коэффициентом полезного действия (КПД) теплового двигателя*.

• *Коэффициентом полезного действия ( $\eta$ ) теплового двигателя называют отношение совершенной им полезной работы к количеству теплоты, полученному от нагревателя:*

$$\eta = \frac{A'}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}. \quad (7.28)$$

Невозможность работы теплового двигателя без холодильника приводит к тому, что их КПД всегда меньше 100%. Это значит, что *II закон термодинамики* подтверждает невозможность создания *вечного двигателя второго рода (perpetuum mobile II)*:



• *Вечный двигатель второго рода (perpetuum mobile II)* – это двигатель, превращающий полностью количество теплоты, полученное от нагревателя, в полезную работу.

В 1824 году французский инженер Сади Карно (1796–1832) разработал теорию принципа работы идеального теплового двигателя (двигатель, принцип работы которого подчиняется газовым законам). По этой теории, максимальное КПД идеального теплового двигателя

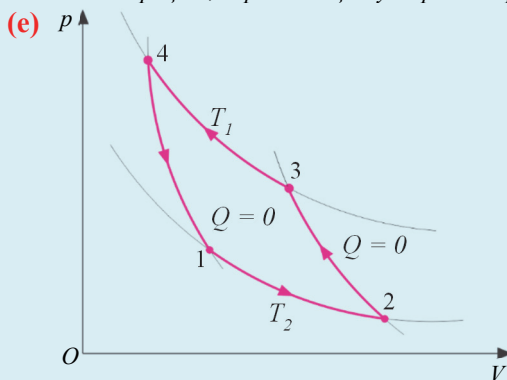
зависит только от абсолютных температур нагревателя и холодильника:

$$\eta_{max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (7.29)$$

Из выражения (7.29) видно, что для увеличения КПД двигателя необходимо повышение температуры нагревателя и понижения температуры холодильника.

Циклический процесс, реализуемый идеальным тепловым двигателем, состоит из двух изотерм и двух адиабат и называется *циклом Карно (d)*. Для тепловых двигателей этот цикл называется *прямым циклом*.

**Принцип работы холодильных установок.** Для работы двигателя в режиме холодильной установки должен выполняться процесс, обратный циклу Карно – *обратный цикл (e)*.



Из схемы превращения энергии в холодильной установке видно, что рабочее тело, расширяясь, получает от холодильной камеры определенное количество теплоты  $Q_2$ . В это время внешние силы, совершая работу  $A$ , сжимают рабочее тело, в результате оно передает нагревателю определенное количество теплоты  $Q_1$  ( $Q_1 > Q_2$ ) (f):

$$Q_1 = Q_2 + A.$$

Таким образом, процесс передачи количества теплоты от холодного тела к тепловому в термодинамической системе происходит не самостоятельно, а в результате совершения работы внешними силами.



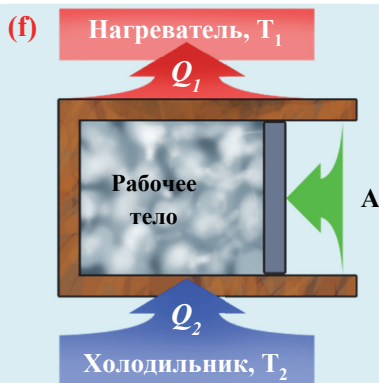
Важной характеристикой холодильной установки является **коэффициент охлаждения**.

• **Коэффициентом охлаждения** ( $\xi$  – psi) холодильной установки называют отношение количества теплоты, полученного от холодильника, к работе, совершенной внешними силами (например, электродвигателем):

$$\xi = \frac{Q_2}{A} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}. \quad (7.30)$$

Коэффициент охлаждения идеальной холодильной установки:

$$\xi_{\max} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}. \quad (7.31)$$



### Исследование-2. Применение. Определение полезной работы, совершенной тепловым двигателем

**Задача:** Полезная работа, совершенная тепловым двигателем, получившим от нагревателя количество теплоты 800 кДж, составляет 40% от количества теплоты, переданного холодильнику. Определите полезную работу, совершенную тепловым двигателем.

**Обсуждение результатов:**

- По какой формуле определяется полезная работа, совершенная тепловым двигателем?
- Чему равна полезная работа теплового двигателя, определенная из проведенных вычислений?

**Применение в повседневной жизни:**

Сравните максимальное значение КПД двигателя автомобиля в Баку в зимние и летние месяцы. Температура нагревателя двигателя 1000°C, температура атмосферы зимой – 3°C, а летом же – 37°C.

- От чего зависит максимальное значение КПД теплового двигателя?
- В каком сезоне максимальное значение КПД теплового двигателя гораздо больше?

**Провести самооценку:**

1. Какие понятия повторили на уроке? Что из этого вы хорошо поняли, а что осталось вам не ясным?
2. Какова основная особенность природных явлений?
3. Как выражается второй закон термодинамики?
4. Что такое вечный двигатель второго рода?
5. Чему равен КПД теплового двигателя?
6. Чему равен КПД идеального теплового двигателя?
7. Какое значение имеет второй закон термодинамики для живых систем?

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Запишите в рабочем листке определения нижеприведенных понятий и положений: “выражение второго закона термодинамики по Клаузиусу”, “выражение второго закона термодинамики по Томсону”, “необратимый процесс”, “тепловой двигатель”, “основные части теплового двигателя”, “КПД теплового двигателя”, “вечный двигатель второго рода”, “цикл Карно”.

**•ПРОЕКТ•** ПОДГОТОВИТЬ ЭЛЕКТРОННУЮ ПРЕЗЕНТАЦИЮ ПРОЕКТА  
по теме  
**“ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ И ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА”**

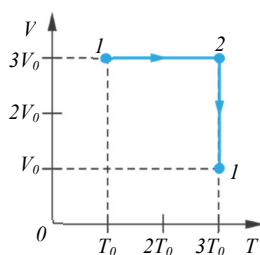
**План проекта:**

1. Роль тепловых двигателей в загрязнении окружающей среды.
2. Положительные и отрицательные аспекты использования твердого горючего.
3. Возникновение в атмосфере “парникового” эффекта и его вредное воздействие на окружающую среду.
4. “Как решаются проблемы увеличения КПД двигателей?”.

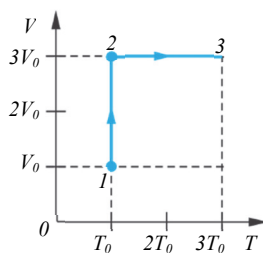
Ресурсы:

- [az.wikipedia.org](http://az.wikipedia.org)»Ətraf mühitin çirklənməsi
- [eco.gov.az/uploads/hesabat/Jurnal-1.pdf](http://eco.gov.az/uploads/hesabat/Jurnal-1.pdf)
- [library.adau.edu.az/upload/book/324\\_mühazirə\\_9.doc](http://library.adau.edu.az/upload/book/324_mühazirə_9.doc)
- [ardda.gov.az/NewSite/wp-content/uploads/2012/07/...](http://ardda.gov.az/NewSite/wp-content/uploads/2012/07/...)
- [unece.org/fileadmin/DAM/env/eia/meetings/...](http://unece.org/fileadmin/DAM/env/eia/meetings/...)
- [wikimapia.org/29881298...](http://wikimapia.org/29881298...)»Ətraf-mühitin-çirklənməsi
- [video.yandex.ru](http://video.yandex.ru)»istilik mühərrikləri və ətraf mühitin çirklənməsi
- [statistika.nmr.az/source/environment/index.php](http://statistika.nmr.az/source/environment/index.php)
- [aliyasalimova.com/index/fizika...](http://aliyasalimova.com/index/fizika...)»ekologiya\_elementl...
- [stat.gov.az/menu/4/e-reports/az/07/007.php](http://stat.gov.az/menu/4/e-reports/az/07/007.php)
- [addy.gov.az/index/pdf/BGW\\_TK2\\_Official EIA.pdf](http://addy.gov.az/index/pdf/BGW_TK2_Official_EIA.pdf)
- [book.ilkaddimlar.com/d\\_pdf\\_book\\_diger\\_23485.do](http://book.ilkaddimlar.com/d_pdf_book_diger_23485.do)
- [toyotabaku.az](http://toyotabaku.az)
- [bakuexpocenter.az/az/exhibitions.php](http://bakuexpocenter.az/az/exhibitions.php)
- [ncp.ge/files/ESG...](http://ncp.ge/files/ESG...)»azerbaijanulad/sabunebismetyelo...

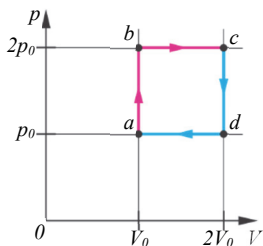
- 7.1. При нагревании 2-х молей газообразного аргона его внутренняя энергия увеличивается на  $\Delta U = 480$  Дж. На сколько увеличится температура аргона ( $R = 8 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ )?
- 7.2. Вычислите работу, совершенную в процессе расширения воздуха данной массы от  $0,05 \text{ м}^3$  до  $0,1 \text{ м}^3$  при постоянном давлении  $2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ .
- 7.3. Воздух данной массы при изобарном расширении объема от 2 л до 5 л совершил работу 4 кДж. Определите давление воздуха.
- 7.4. Над газом была совершена работа 40 кДж, газ передал сторонним телам 60 кДж количества теплоты. Как изменилась внутренняя энергия газа?
- 7.5. Над идеальным газом данной массы произведен процесс 1–2–3. Как изменяется внутренняя энергия на участках процесса 1–2 и 2–3?



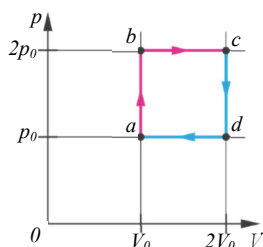
- 7.6. Над идеальным газом данной массы произведен процесс 1–2–3. Как изменяется внутренняя энергия на участках процесса 1–2 и 2–3?



- 7.7. В идеальном тепловом двигателе проходит циклический процесс  $a - b - c - d - a$ . Определите работу, совершенную газом на участке процесса  $a - b - c$ .



- 7.8. В идеальном тепловом двигателе происходит циклический процесс  $a - b - c - d - a$ .  
Определите изменение внутренней энергии газа на участке процесса  $a - b - c$ .



- 7.9. В результате передачи одноатомному идеальному газу данной массы, помещенному в закрытый сосуд, количества теплоты 5 кДж его температура увеличивается от  $0^\circ\text{C}$  до  $100^\circ\text{C}$ .  
Определите:
- на сколько увеличилась внутренняя энергия газа;
  - количество вещества в сосуде.
- 7.10. Коэффициент полезного действия теплового двигателя 20%. Определите полезную работу, совершенную двигателем, если количество теплоты, переданное холодильнику за один цикл, равно 1,2 кДж.

## А

**Адиабатный процесс** – процесс, происходящий в системе без теплообмена с окружающей средой.

**Акселерометр** (по-лат.: *accelero* – “ускоряю” и по-греч.: *metreo* – “измеряю”) – прибор для измерения ускорения.

**Аморфные тела** – твердые тела, атомы и молекулы которых не расположены упорядоченно в пространстве. Аморфные тела изотропны, т.е. их физические свойства внутри по всем направлениям одинаковы. У аморфных тел нет определенной температуры плавления, по мере нагревания они смягчаются и превращаются в жидкость.

**Амплитуда колебаний** – наибольшее смещение колеблющегося тела от положения равновесия.

**Анизотропность** – зависимость физических свойств вещества (механических, тепловых, электрических, оптических и других) от направления.

**Атомная единица массы (а.е.м.)** – внесистемная единица массы, применяемая для масс молекул, атомов, атомных ядер и элементарных частиц, равная  $1/12$  массы изотопа  $^{12}_6\text{C}$ :

$$1 \text{ а. е. м} = \frac{1}{12} m_{0, \text{C}} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

**Число Авогадро (постоянная Авогадро)** – число молекул (атомов) в 1 моле вещества. Определяется как количество атомов в 12 граммах изотопа углерода  $^{12}_6\text{C}$ :

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

**Закон Авогадро:** в равных объемах любых газов при одинаковой температуре и давлении содержится одинаковое число молекул.

**Абсолютная влажность** – физическая величина, равная плотности водяного пара в воздухе в данных условиях.

Абсолютную влажность (плотность водяного пара в воздухе) можно выразить через парциальное давление водяного пара на основе уравнения Менделеева-Клапейрона:

$$\rho_v = \frac{p_v M}{RT}.$$

Где  $\rho_v$  – плотность водяного пара в воздухе – абсолютная влажность,  $M = 18 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$  – молярная масса воды,  $T$  – температура воздуха,  $p_v$  – парциальное давление водяного пара,  $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{К моль}}$  – универсальная газовая постоянная. Абсолютная влажность обычно измеряется в  $\text{г/м}^3$ .

## Б

**Броуновское движение** – непрерывное хаотическое движение малых частиц, взвешенных в жидкости или газе.

**Закон Бойля-Мариотта:** для данной массы газа при неизменной температуре произведение давления газа на его объем постоянно ( $T = \text{const}, m = \text{const}$ ):

$$pV = \frac{m}{M}RT = \text{const}.$$

Для данной массы газа при неизменной температуре произведение давления начального состояния газа  $p_1$  на его первоначальный объем  $V_1$  равно произведению значений этих параметров  $p_2$  и  $V_2$  в произвольном состоянии:

$$p_1V_1 = p_2V_2 \rightarrow \frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}.$$

Процесс изменения состояния идеального газа данной массы при постоянной температуре ( $T = \text{const}$ ) называют **изотермическим процессом**. В изотермическом процессе давление и объем газа обратно пропорциональны друг другу.

## В

**Вечный двигатель первого рода (perpetuum mobile I)** – двигатель, однажды приведенный в действие, совершает работу вечно, не получая энергию извне.

**Вечный двигатель второго рода (perpetuum mobile II)** – двигатель, полностью превращающий полученное от нагревателя количество теплоты в полезную работу.

**Вес** – это сила, с которой тело вследствие притяжения к Земле действует на опору или подвес.

**Внутренняя энергия** – сумма энергий, характеризующих разные виды движения и взаимодействия частиц, из которых состоит тело.



**Волна** – это процесс распространения колебаний в пространстве с течением времени.

**Закон всемирного тяготения** – между любыми двумя материальными точками действует сила взаимного притяжения, прямо пропорциональная произведению масс этих точек и обратно пропорциональная квадрату расстояния между ними:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

Где  $F$  – модуль силы притяжения (гравитации),  $m_1$  и  $m_2$  – массы материальных точек,  $r$  – расстояние между материальными точками,  $G$  – коэффициент пропорциональности, называемый *постоянной всемирного тяготения (гравитации)* или просто *гравитационной постоянной*.

**Ватт (1Вт)** – единица измерения мощности в СИ. 1 Вт – мощность механизма, который за 1 с совершает работу в 1 Дж.

**Векторная величина** – величина, определяемая кроме числового значения (модуля), также и направлением.

**Вынужденные колебания** – колебания, происходящие под действием внешних, периодически изменяющихся сил.

## Г

**Закон Гей–Люссака** – для данной массы газа при неизменном давлении отношение объема газа к его абсолютной температуре постоянно ( $p = \text{const}, m = \text{const}$ ):

$$\frac{V}{T} = \frac{mR}{M} \cdot \frac{1}{p} = \text{const}.$$

При неизменном давлении отношение первоначального объема  $V_1$  газа к его начальной температуре  $T_1$  равно отношению параметров  $V_2$  к  $T_2$  в произвольном состоянии:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}.$$

Процесс изменения состояния данной массы идеального газа при постоянном давлении называется **изобарным процессом** ( $p = \text{const}$ ). При изобарном процессе объем данной массы газа прямо пропорционален его температуре.

**Гармонические колебания** – колебания, при которых физические величины, характеризующие состояние системы, совершающей свободные колебания, изменяются со временем по закону синуса или косинуса.

**Гравитационная постоянная** – универсальная физическая постоянная, коэффициент пропорциональности в законе всемирного тяготения – численно равна силе притяжения между двумя материальными точками массой 1 кг каждая, расстояние между которыми равно 1 м.

Численное значение гравитационной постоянной опытным путем в 1798 году определил английский ученый Генри Кавендиш (1731–1810). Это значение одинаково для всех тел во Вселенной, вне зависимости от их размеров и масс:

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}.$$



## Д

**Джоуль (1 Дж)** – единица измерения работы в СИ. 1 Дж – это работа, которую совершает сила 1 Н, перемещая тело на 1 м в направлении действия силы:

$$[A] = 1\text{Н} \cdot \text{м} = 1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2} = 1\text{Дж}.$$

**Длина волны** – расстояние ( $l = \lambda$ ), на которое распространяется волна за время, равное одному периоду колебания ( $t = T$ ). Длина волны в однородной среде прямо пропорциональна периоду колебаний и обратно пропорциональна частоте колебаний.

**Деформация** – изменение формы и размеров тела под действием внешней силы.

**Динамика** (по-гречески *dinamikos* – “сильный”, “мощный”) – раздел механики, изучающий причины возникновения механического движения и влияние этих причин на характер движения.

**Диаграмма напряжения** – график зависимости механического напряжения от относительного удлинения твердого тела.

**Закон Дальтона** – давление смеси химически не взаимодействующих идеальных газов равно сумме парциальных давлений этих газов:

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n.$$

## И

**Испарение** – процесс парообразования, происходящий с поверхности жидкости при любой температуре.

**Идеальный газ** – газ, удовлетворяющий нижеследующим условиям:

- расстояния между молекулами во много раз больше размеров молекул. Объемы молекул пренебрежимо малы, поэтому идеальный газ можно сжимать сколько угодно;

- взаимодействия между молекулами настолько малы, что их можно не учитывать.

Поэтому потенциальная энергия взаимодействия молекул равна нулю:  $E_p = 0$ .

- Только при соударении молекул друг с другом или со стенками сосуда между ними возникают силы отталкивания; соударения молекул абсолютно упругие;

- Скорость молекул может иметь произвольные значения, движение каждой молекулы подчиняется законам классической механики Ньютона.

**Импульс** – векторная физическая величина, называемая также количеством механического движения, равна произведению массы тела на его скорость. Обозначается буквой  $\vec{p}$ :

$$\vec{p} = m\vec{v}.$$

**Изотропность** – независимость физических свойств вещества от направления в нем.

## З

**Замкнутая система** – система, состоящая из тел, находящихся во взаимодействии только друг с другом и не взаимодействующих с телами, не входящими в систему (равнодействующая внешних сил равна нулю). В замкнутых системах выполняются законы сохранения.

## К

**Критическая температура** – температура, при которой исчезают различия между жидкостью и ее насыщенным паром. При температурах выше критической газ невозможно сконденсировать ни при каком давлении.

**Коэффициент полезного действия ( $\eta$ ) теплового двигателя** – отношение полезной работы, совершенной двигателем, к количеству теплоты, полученному от нагревателя:

$$\eta = \frac{A_{\text{п}}}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}.$$

**Капилляр** – трубочка (канал) диаметром меньше  $10^{-3}\text{ м}$ .

**Кинетическая энергия** – энергия, которой обладает движущееся тело:

$$E_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2}.$$

**Конденсация** – процесс превращения пара в жидкость. Конденсируясь, пар передает окружающей среде количество теплоты  $Q = Lm$ . В результате конденсации жидкости выделяется количество теплоты, затраченное на ее парообразование.

**Количество вещества ( $\nu$ )** – физическая величина, характеризующая количество частиц (молекул, атомов и т.д.), содержащихся в веществе. Определяется как:

$$\nu = \frac{N}{N_A}.$$

$N$  – число молекул в данном веществе.

Единица измерения количества вещества – основная единица в СИ  $[\nu] = 1 \text{ моль}$ .

1 моль – это количество вещества, в котором содержится столько же молекул или атомов, сколько их содержится в 0,012 кг углерода.

**Концентрация молекул** – число молекул в единице объема:

$$n = \frac{N}{V}.$$

**Коэффициент поверхностного натяжения** – коэффициент пропорциональности между силой поверхностного натяжения и длиной контура, на которой это сила действует. Численно равен значению силы поверхностного натяжения, приходящейся на единицу длины соприкосновения:

$$\sigma = \frac{F_{\text{н}}}{l}.$$

**Коэффициент охлаждения ( $\xi$  – psi) холодильной установки** – отношение количества теплоты, полученной от холодильника, к работе, совершенной внешними силами (например, электродвигателем):

$$\xi = \frac{Q_2}{A} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}.$$

Коэффициент охлаждения идеальной холодильной установки:

$$\xi_{\text{max}} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}.$$

## Л

**Линейная скорость** – модуль скорости материальной точки, движущейся по окружности.

## М

**Мощность** – скалярная физическая величина, равная отношению совершенной работы ко времени, затраченному на выполнение этой работы:

$$N = \frac{A}{t}.$$

Единица измерения мощности в СИ – *ватт (Вт)*:

$$[N] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = 1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^3} = 1 \text{Вт}.$$

**Материальная точка** – тело, размерами которого можно пренебречь в условиях исследуемой задачи.

**Макроскопическое тело** – тело, состоящее из большого числа атомов и молекул.

**Механика** – наука, изучающая закономерности механического движения и причины возникновения движения (от греческого слова *tekhnē* – “машина”, “механизм”).

**Механическая волна** – процесс распространения механических колебаний в упругой среде (механическая волна в вакууме не распространяется).

**Механическое движение** – изменение положения тела относительно других тел в пространстве с течением времени.

**Механическая работа** – скалярная физическая величина – количественная мера действия силы на тело, равная произведению модуля силы, модуля перемещения и косинуса угла между векторами силы и перемещения:

$$A = F \cdot s \cdot \cos \alpha.$$

**Механическое колебательное движение** – повторяющееся движение тела в противоположных направлениях около положения устойчивого равновесия.

**Мениск жидкости** – искривление свободной поверхности жидкости в результате соприкосновения ее с поверхностью твердого тела (или с другой жидкостью).

**Молекулярная физика** – раздел физики, в котором изучается внутреннее строение макроскопических тел, их свойства и основные закономерности теплового движения материи. Положения молекулярно-кинетической теории:

I положение: все вещества состоят из частиц – атомов и молекул.

II положение: частицы, из которых состоят вещества, находятся в непрерывном и беспорядочном (хаотическом) движении.

III положение: частицы вещества находятся во взаимодействии друг с другом – между ними существуют силы взаимного притяжения и отталкивания.

**Молярная масса** – масса одного моля вещества:

$$M = m_0 \cdot N_A$$

где  $m_0$  – масса одной молекулы,  $N_A$  – число частиц в 1 моле. Единица измерения молярной массы в СИ – *кг/моль*.

**Монокристалл** – кристалл, возникающий в результате роста его из одного центра.

**Математический маятник** – идеализированная колебательная система, состоящая из материальной точки, подвешенной на невесомой и нерастяжимой нити.

**Модуль Юнга** – коэффициент пропорциональности между механическим напряжением и относительным удлинением в законе Гука. Численно равен механическому

напряжению, вызывающему увеличение длины образца в 2 раза. Модуль Юнга характеризует свойства материала сопротивляться деформации, зависит только от свойств материала и не зависит от размеров и формы тела. Единица измерения в СИ – паскаль:

$$[E] = \frac{[\sigma]}{[\varepsilon]} = 1 \text{ Па.}$$

## Н

**Насыщенный пар** – пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью. Динамическое равновесие между жидкостью и ее паром наступает, когда число частиц, покидающих жидкость за единицу времени, равно числу частиц, возвращающихся в жидкость за это же время.

**Ненасыщенный пар** – пар, не находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью.

**Необратимый процесс** – процесс, который может самопроизвольно протекать только в одном направлении.

**Несмачивающая жидкость** – жидкость, молекулы которой притягиваются друг к другу сильнее, чем к молекулам твердого тела. В результате свободная поверхность жидкости в сосуде становится выпуклой (силы притяжения между молекулами жидкости собирают ее в капельку). Так ведет себя ртуть на стекле, вода на парафине. Краевой угол (угол смачивания) для несмачивающей жидкости – тупой (при полном несмачивании  $\theta=180^\circ$ ).

**Напряженность гравитационного поля** – векторная физическая величина, равная отношению силы притяжения, действующей на материальную точку (тело) в гравитационном поле, к его массе:

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}}{m}.$$

Где  $\vec{g}$  – напряженность гравитационного поля,  $m$  – масса материальной точки (тела) в гравитационном поле,  $\vec{F}$  – сила притяжения, действующая на материальную точку в гравитационном поле.

Модуль напряженности гравитационного поля прямо пропорционален массе источника данного поля и обратно пропорционален квадрату расстояния до данной точки. Модуль напряженности гравитационного поля не зависит от массы тела, помещенного в это поле. Вектор напряженности гравитационного поля в произвольной точке этого поля направлен вдоль радиуса к центру источника поля. В данной точке гравитационного поля модуль и направление вектора напряженности гравитационного поля совпадают с модулем и направлением ускорения свободного падения.

**I закон Ньютона:** существуют такие системы отсчета, относительно которых тела сохраняют свое состояние покоя или равномерного прямолинейного движения при отсутствии какого-либо внешнего воздействия на них (или действующие на них силы уравновешивают друг друга).

**II закон Ньютона:** в инерциальной системе отсчета ускорение, получаемое телом, прямо пропорционально равнодействующей силе и обратно пропорционально массе тела:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} \quad \text{или} \quad m\vec{a} = \vec{F}.$$

**III закон Ньютона:** в инерциальной системе отсчета силы, с которыми два тела действуют друг на друга, равны по модулю и направлены по прямой в противоположные стороны:

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2.$$

**1 ньютон (1 Н)** – единица измерения силы в СИ. 1 ньютон – это сила, под действием которой тело массой 1 кг получает ускорение  $1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ :

$$[F] = [m][a] = 1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} = 1 \text{Н}.$$

## О

**Однородность времени** – симметрия относительно параллельного переноса времени: физические свойства замкнутой системы не зависят от выбора начального момента времени, то есть все моменты времени эквивалентны (равноправны).

**Основная задача динамики** – определить характер движения тела в соответствии с действующей на него силой, или наоборот, по характеру движения тела определить, какая сила действует на него.

**Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа** – уравнение, связывающее макроскопический параметр газа – давление, с микроскопическими параметрами, характеризующими молекулы газа:

$$p = \frac{1}{3} m_0 n \overline{v^2}.$$

**Относительная молекулярная (атомная) масса вещества** – физическая величина, равная отношению массы молекулы (атома) вещества  $m_0$  к  $1/12$  массы атома углерода:

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_{0,C}}.$$

$M_r$  – относительная молекулярная масса,  $m_0$  – масса молекулы (атома) вещества,

$m_{0,C}$  – масса атома углерода.

**Относительная влажность** – физическая величина, равная отношению абсолютной влажности воздуха при данной температуре к плотности насыщенного водяного пара при той же температуре. Относительная влажность выражается в процентах:

$$\varphi = \frac{\rho}{\rho_0} \cdot 100\%.$$

Где  $\rho_0$  – плотность насыщенного водяного пара в воздухе,  $\rho$  – плотность водяного пара в воздухе (абсолютная влажность воздуха),  $\varphi$  – относительная влажность воздуха.

**Первый принцип общей теории относительности** – принцип эквивалентности или слабый принцип эквивалентности: на основании этого принципа инерциальная масса считается эквивалентной гравитационной массе, то есть они равны друг другу.

**Второй принцип общей теории относительности** – сильный принцип эквивалентности: по этому принципу в системе, падающей с ускорением, равным ускорению свободного падения, все законы физики выполняются как бы в отсутствии гравитации, то есть в этой системе невозможно различить эффект притяжения и ускоренное движение.

## П

**Парообразование** – процесс перехода вещества из жидкого состояния в газообразное.

**Период обращения** – время, затраченное на один полный оборот материальной точки по окружности:

$$T = \frac{t}{N}.$$

Где  $T$  – период обращения,  $N$  – число полных оборотов материальной точки за время  $t$ . За единицу периода обращения в СИ принята секунда:  $[T] = 1\text{с}$ .

**Период колебаний** – время, за которое совершается одно полное колебание.

**Прямолинейное неравномерное движение** – прямолинейное движение, при котором за равные промежутки времени материальная точка совершает разные перемещения.

**Принцип относительности Галилея:** законы механики во всех инерциальных системах отсчета одинаковы.

**Парциальное давление** – давление отдельно взятого компонента газовой смеси. Общее давление газовой смеси является суммой парциальных давлений её компонентов.

**Поликристаллы** – кристаллы, возникающие в результате роста и соединения многочисленных монокристаллов, хаотично ориентированных в пространстве.

**Потенциальная энергия гравитационного взаимодействия** – энергия, которой обладают взаимодействующие тела (или частицы):

$$E_p = mgh.$$

**Потенциальная энергия упруго деформированного тела** – энергия, которой обладают деформированные тела, равна половине произведения жесткости пружины на квадрат ее удлинения:

$$E_p = \frac{kx^2}{2}.$$

**Поперечная волна** – волна, распространяющаяся перпендикулярно направлению колебательного движения частиц среды. Поперечные волны могут распространяться только в твердых телах и на поверхности жидкостей. Поперечные волны распространяются в среде в форме сменяющих друг друга выпуклостей и впадин.

**Поступательное движение** – движение тела, при котором все его точки движутся одинаково.

**Продольная волна** – волна, распространяющаяся вдоль направления колебательного движения частиц среды. Продольные волны могут распространяться во всех средах (твердых телах, жидкостях и газах). Продольные волны распространяются в среде в форме сменяющих друг друга зон сгущений и разрежений вещества.

**Пружинный маятник** – колебательная система, состоящая из пружины с закрепленным на ней телом.

**Перемещение** – направленный отрезок прямой, соединяющий начальное положение движущейся материальной точки с ее конечным положением.

## Р

**Равнопеременное движение** – движение, при котором за любые равные промежутки времени изменение скорости тела остается постоянным. При равнопеременном движении значение и направление ускорения тела не меняется:

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t} = \frac{\Delta \vec{v}}{t} = \text{const.}$$

**Равномерное движение по окружности** – движение, при котором траектория материальной точки представляет собой окружность, модуль ее скорости в каждой точке этой окружности остается неизменным.



**Равномерное прямолинейное движение** – движение, при котором траектория материальной точки представляет собой прямую линию, и за равные промежутки времени совершает одинаковые перемещения. При равномерном прямолинейном движении модуль и направление скорости с течением времени не изменяются:

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

**Радиус-вектор** – вектор, соединяющий начало координат с положением материальной точки.

**Релятивистская механика** – раздел физики, рассматривающий законы механики (законы движения) при скоростях, сравнимых со скоростью света.

**Резонанс** – явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частоты изменения вынуждающей силы с частотой собственных колебаний системы.

## С

**Сила тяжести** – сила, с которой Земля (планета) притягивает тела. Сила тяжести равна произведению массы тела, помещенного в гравитационное поле Земли (планеты), на ускорение свободного падения:

$$\vec{F}_T = m\vec{g}.$$

**Скорость волны** – скорость распространения колебаний в среде. Скорость волны не зависит от частоты и периода колебаний в ней. Скорость волны зависит от свойств и агрегатного состояния среды.

При переходе волны из одной среды в другую её период и частота не изменяются, меняются лишь скорость и длина волны.

**Сила трения качения** – сила трения, возникающая, когда одно тело катится по поверхности другого тела.

**Сила упругости** – сила, возникающая при деформациях тела и действующая в направлении восстановления тела в первоначальном состоянии.

**Система отсчета** – система, состоящая из тела отсчета, системы координат, связанной с этим телом, и прибора для отсчета времени.

**Специальная теория относительности:**

**I постулат** – все законы физики одинаковы во всех инерциальных системах отсчета и ни одним физическим опытом невозможно отличить эти системы друг от друга.

**II постулат** – скорость света в вакууме одинакова во всех инерциальных системах отсчета и не зависит от скорости движения источников и приемников света.

**Скорость света** – максимальная скорость, существующая в природе.

**Смачивающая жидкость** – жидкость, молекулы которой притягиваются друг к другу слабее, чем к молекулам твердого тела. В результате свободная поверхность жидкости в сосуде становится вогнутой (жидкость стремится прижаться к поверхности твердого тела, расплывается по ней). Так ведет себя ртуть на цинке, вода на стекле. Краевой (угол смачивания) для смачивающей жидкости – острый (при полном смачивании  $\theta = 0$ ).

**Средняя квадратичная скорость молекул** – квадратный корень из среднего значения квадрата скорости:

$$v_{\text{ср.кв.}} = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2}{N}}.$$



В МКТ средняя квадратичная скорость молекул вычисляется по нижеприведенным формулам:

$$v_{\text{ср.кв.}} = \sqrt{\frac{2\overline{E}_k}{m_0}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3p}{\rho}}.$$

Где  $T$  – абсолютная температура,  $k$  – постоянная Больцмана,  $m_0$  – масса одной молекулы,  $n$  – концентрация молекул,  $\overline{E}_k$  – среднее значение кинетической энергии поступательного движения молекул,  $\rho$  – плотность,  $p$  – давление.

**Сила сопротивления** – сила, возникающая во время движения твердого тела в жидкости и газе.

**Сила поверхностного натяжения** – сила, направленная вдоль поверхности, перпендикулярно к линии, ограничивающей поверхность жидкости, и стремящаяся сократить площадь поверхности жидкости. Сила поверхностного натяжения прямо пропорциональна длине границы соприкосновения свободной поверхности жидкости с твердым телом:

$$F_{\text{н}} = \sigma \cdot l.$$

Где  $F_{\text{н}}$  – сила поверхностного натяжения жидкости,  $l$  – длина границы соприкосновения свободной поверхности жидкости с твердым телом,  $\sigma$  (сигма) – коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

**Свободное падение** – это движение тел под действием только силы тяжести (под действием притяжения Земли). Свободное падение является равноускоренным движением из состояния покоя ( $v_0=0$ ), с ускорением  $\vec{g}$ .

**Свободные колебания** – колебания, возникающие в результате действия внутренних консервативных сил в замкнутой системе.

**Сила трения скольжения** – сила трения, возникающая при скольжении одного тела по поверхности другого. Числовое значение силы трения скольжения прямо пропорционально силе реакции опоры (силе давления) и равно максимальному значению силы трения покоя:

$$(F_{\text{тр.}})_{\text{скольжения}} = (F_{\text{тр.}})_{\text{max покоя}} = \mu N.$$

Где  $\mu$  – коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом трения скольжения, зависит от материалов, из которых изготовлены соприкасающиеся тела, и качества обработки соприкасающихся поверхностей.  $\mu$  – безразмерная величина, единица измерения отсутствует.

**Сила трения покоя** – сила трения, возникающая между телами, находящимися в состоянии покоя друг относительно друга. Сила трения покоя по модулю равна силе тяги, действующей вдоль поверхности соприкосновения, и направлена противоположно ей.

## Т

**Температура** – макроскопическая величина, характеризующая тепловое равновесие системы: при тепловом равновесии температура всех частей системы одинакова. Температура – мера средней кинетической энергии хаотического поступательного движения молекул тела.

**Термодинамика** – раздел физики, изучающий тепловые свойства макроскопических систем и способы передачи и превращения энергии в них.

**Первый закон термодинамики** – изменение внутренней энергии термодинамической системы равно количеству теплоты, переданного этой системе, и работе внешних сил, совершенной над системой:

$$\Delta U = Q + A.$$

Первый закон термодинамики можно записать так: количество теплоты, сообщенное термодинамической системе, затрачивается на изменение ее внутренней энергии и работу, которую система совершает против внешних сил:

$$Q = \Delta U + A'.$$

**Второй закон термодинамики:** (определяет направленность термодинамического процесса) тепловая энергия самопроизвольно может передаваться только в направлении установления теплового равновесия, то есть от теплого тела к холодному. Процесс передачи тепла от холодного тела к теплему возможен только в результате совершения работы.

**Термодинамическая система** – любое макроскопическое тело или система тел. Состояние термодинамической системы характеризуется макроскопическими, или термодинамическими, параметрами (масса, плотность, объем, давление, температура).

**Теплота парообразования** – количество теплоты необходимое для превращения жидкости массой  $m$  в пар при постоянной температуре:

$$Q = Lm.$$

**Тепловое или термодинамическое равновесие** – состояние системы, когда ее макроскопические параметры длительное время не изменяются.

**Тепловая машина** – термодинамическая система, выполняющая циклический процесс (совершающая механическую работу), передавая количество теплоты от одного тела другому.

**Тепловой двигатель** – установка, преобразующая внутреннюю энергию разного вида топлива в механическую энергию.

Независимо от особенностей строения, все тепловые двигатели состоят из трех основных частей:

1. Нагреватель – это часть двигателя, сохраняющая постоянную высокую температуру  $T_1$ , создаваемую за счет сгорания разных видов топлива или в результате выделения энергии в ядерных реакциях.

2. Рабочее тело – это газ или пар, совершающий механическую работу в результате расширения-сжатия.

3. Холодильник – это часть двигателя с температурой  $T_2$  ( $T_2 < T_1$ ): окружающая среда (атмосфера), вода.

За один цикл рабочее тело получает от нагревателя количество теплоты  $Q_1$ , отдает холодильнику количество теплоты  $Q_2$  и совершает полезную работу  $A_{\text{полез}}$ :

$$A_{\text{полез}} = Q_1 - Q_2.$$

**Теорема о кинетической энергии:** работа, совершаемая над телом постоянной равнодействующей силой, равна изменению кинетической энергии тела:

$$A = E_{k2} - E_{k1} = \Delta E_k. \quad (3.14)$$

Где  $E_{k1}$  и  $E_{k2}$  – начальное и конечное значения кинетической энергии тела.

**Теорема о потенциальной энергии:** работа, совершаемая консервативной силой равна изменению потенциальной энергии, взятой с противоположным знаком:

$$A = -(E_{p2} - E_{p1}) = -\Delta E_p.$$

**Траектория** – линия, которую описывает материальная точка при своем движении в данной системе отсчета.

## У

**Угловая скорость (или круговая частота)** – физическая величина, измеряемая отношением угла поворота к промежутку времени, за которое этот поворот совершен:

$$\omega = \frac{\varphi}{t}.$$

Где  $\omega$  – угловая скорость. Угловая скорость материальной точки, движущейся равномерно по окружности, с течением времени остается постоянной ( $\omega = \text{const}$ ). Единица угловой скорости в СИ – радиан в секунду:

$$[\omega] = 1 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

**Упругие волны** – процесс передачи механической волны в упругой среде.

**Удельная теплота парообразования** – физическая величина, численно равная количеству теплоты, необходимому для полного превращения жидкости массой 1 кг в пар при постоянной температуре:

$$L = \frac{Q}{m}.$$

Единица измерения удельной теплоты парообразования в СИ:

$$[L] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} = 1 \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}.$$

**Удельная теплота плавления** – физическая величина, численно равна количеству теплоты, затраченному на превращение 1 кг кристаллического вещества в жидкость при температуре плавления.

$$\lambda = \frac{Q}{m}.$$

Единица измерения удельной теплоты плавления в СИ:

$$[\lambda] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} = 1 \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}.$$

**Уравнение состояния идеального газа** – уравнение, описывающее состояние газа и определяющее связь между макроскопическими параметрами его начального и конечного состояний.

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \text{ или } \frac{pV}{T} = \text{const}.$$

**Условия равновесия:**

1. Тело, движущееся поступательно, находится в состоянии равновесия, если действующая на него равнодействующая (геометрическая сумма всех действующих на тело сил) равна нулю:  $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = \vec{F} = 0$ .

2. Тело с неподвижной осью вращения находится в состоянии равновесия, если алгебраическая сумма моментов сил, действующих на него, относительно оси вращения равна нулю:

$$M_1 + M_2 + \dots + M_n = 0$$

**Ускорение** – векторная физическая величина, равная отношению изменения скорости ко времени, за которое это изменение произошло:

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}.$$

Направление вектора ускорения совпадает с направлением вектора изменения скорости  $\Delta \vec{v}$ .

**Угол поворота** – это угол, на который поворачивается радиус-вектор, соединяющий тело, движущееся по окружности, с центром этой окружности. Угол поворота равен отношению длины дуги окружности между начальным и конечным положениями тела к радиусу окружности:

$$\varphi = \frac{l}{R}.$$

Здесь  $\varphi$  – угол поворота,  $l$  – длина дуги, соответствующая углу поворота,  $R$  – радиус окружности.

## Ц

**Циклическая частота** – физическая величина, показывающая, сколько колебаний совершает колеблющееся тело за  $2\pi$  секунд (за 6,28 секунды), поэтому циклическая частота в  $2\pi$  раз больше обычной частоты колебания.

## Ч

**Частота волны (период)** – частота (период) колебаний источника, создающего волну.

**Частота обращения** – число оборотов материальной точки по окружности за единицу времени:

$$\nu = \frac{N}{t}.$$

За единицу частоты вращения в СИ принят один полный оборот за секунду или герц:

$$[\nu] = \frac{1}{c} = c^{-1} = 1 \text{ Гц}.$$

Частота вращения обратно пропорциональна периоду обращения:

$$\nu = \frac{1}{T}; \quad T = \frac{1}{\nu}.$$

**Частота колебаний** – физическая величина, численно равная числу колебаний за одну секунду.

## З

**Закон сохранения импульса:** векторная сумма импульсов тел, составляющих замкнутую систему, остается неизменной:

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3 + \dots + \vec{p}_n = \text{const}$$

**Закон Шарля** – для данной массы газа при неизменном объеме отношение давления газа к его абсолютной температуре постоянно ( $V = \text{const}, m = \text{const}$ ):

$$\frac{p}{T} = \frac{mR}{M} \cdot \frac{1}{V} = \text{const}.$$

Если объем газа остается неизменным, то отношение начального давления  $p_1$  газа к его начальной температуре  $T_1$  равно отношению параметров  $p_2$  к  $T_2$  в произвольном состоянии:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}.$$

**Изохорный процесс** ( $V = \text{const}$ ) – это процесс изменения состояния данной массы идеального газа при постоянном объеме. При изохорном процессе давление данной массы газа прямо пропорционально его температуре.

**Закон сохранения полной механической энергии:** полная механическая энергия замкнутой системы тел, взаимодействующих друг с другом консервативными силами, остается неизменной:

$$E_{k2} + E_{p2} = E_{k1} + E_{p1},$$

$$E_{\text{полн}} = \text{const}.$$

Э

**Энергия покоя** – энергия тела, находящегося в состоянии покоя относительно выбранной системы отсчета.

## ОТВЕТЫ ЗАДАЧ

### I глава

- 1.1.  $N(\approx 4,25 \text{ м}; 2,5 \text{ м})$ .  
1.2.  $\approx 4,03 \text{ м}; 2 \text{ м и } -3,5 \text{ м}; 29^\circ$ .  
1.3.  $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}; c = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5$ .  
1.4.  $a_x = 0, a_y = -8; b_x = -3, b_y = 4; c_x = 0, c_y = 6; d_x = 9, d_y = -7; e_x = -4, e_y = -3$ .  
1.5.  $3600 \text{ м}; 0$ .  
1.6.  $12 \text{ см и } \approx 11,06 \text{ см}; 24 \text{ см и } 16 \text{ см}; 36 \text{ см и } \approx 11,06 \text{ см}; 48 \text{ см и } 0 \text{ см}$ .  
1.7. Тележки М и О двигаются относительно тележки N в правую сторону.  
1.8. Тележки М и О относительно тележки N находятся в состоянии покоя.  
1.9.  $\approx 11,7 \text{ мин}; 5 \text{ км}$ .  
1.11.  $90 \text{ м}; \approx 41,23 \text{ м}; 10,246 \text{ с}$ .  
1.12.  $0 \text{ м}; 180000 \text{ м}; 0 \text{ м/с}^2$ .  
1.13.  $20 \text{ м/с}; 36 \text{ км}$ .  
1.15. против направления движения;  
 $\approx 0,17 \text{ м/с}^2$ .  
1.16.  $v_1 = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}}, v_2 = 20 \frac{\text{м}}{\text{с}}, v_3 = 2 \frac{\text{м}}{\text{с}}; v_{or} = 14 \frac{\text{м}}{\text{с}}; 0 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .  
1.17.  $50 \text{ м}; 40 \text{ м}$ .  
1.19.  $10 \frac{\text{м}}{\text{с}}; 2,5 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ .  
1.20.  $\approx 6,7 \frac{1}{\text{с}}$ .

### II глава

- 2.1.  $14 \text{ Н}; 2 \text{ Н}$   
2.2.  $\approx 12, 16 \text{ Н}; 10 \text{ Н}$ .  
2.3.  $0 - t_1; t_3 - t_4; t_5 - t_6$ .  
2.4. не противоречит, произошедшее явление является инерциальным явлением.  
2.5.  $1,875 \text{ м/с}^2$ .  
2.6.  $216 \text{ кН}$ .  
2.7.  $14,4 \text{ кН}$ .  
2.8.  $4,5 \text{ с}$ .  
2.9.  $3 \text{ м/с}^2$ ; вверх.  
2.10.  $2 \text{ м/с}^2; 2 \text{ кН}; 18 \text{ кН}\cdot\text{с}; 261 \text{ м}$ .  
2.11. увеличится в 9 раз.  
2.12.  $g_h = (\frac{gR_{\text{Земли}}^2}{(h+R_{\text{Земли}})^2}) = 0,61 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .  
2.13.  $200 \text{ кН/м}$   
2.14.  $40 \text{ см}$   
2.15.  $\approx 60 \text{ см}; \approx 66,7 \text{ Н/м}$ .  
2.16.  $90 \text{ Н}$ .  
2.17.  $l_t = 87,5 \text{ м}$  — автомобиль ударит стадо.  
2.18.  $\approx 13 \cdot 10^5 \text{ м/с}$ .  
2.19.  $2 \text{ м/с}^2; 25 \text{ кг}$   
2.20.  $400 \text{ Н}; 1200 \text{ Н}$ .

### III глава

- 3.1.  $0,1 \text{ м/с}$   
3.2.  $0,75 \text{ м/с}$   
3.3.  $400 \text{ м/с}$   
3.4.  $1,6 \text{ м/с}$   
3.5.  $144 \text{ Дж}$   
3.6.  $100 \text{ Н}$ .  
3.7.  $-5 \text{ Дж}; 5 \text{ Дж}; 0$   
3.8. Нет  
3.9.  $E_{k1} = 25 \text{ Дж}; E_{k2} = 0 \text{ Дж}$ .  
3.10. увеличится в 4 раза  
3.11.  $2,5 \text{ см}$ .  
3.12.  $A = \frac{m}{2}(v_2^2 - v_1^2) = -80 \text{ Дж}$   
3.13.  $0,02 \text{ Дж}$   
3.14. Кинетическая энергия уменьшится, потенциальная энергия увеличится.  
3.15. Кинетическая энергия увеличится, потенциальная энергия уменьшится.  
3.16.  $3,75 \text{ кг}$   
3.17.  $2 \text{ кг}, 40 \text{ м/с}$ .  
3.18.  $11,25 \text{ м}; 28,125 \text{ Дж}$   
3.19.  $18 \text{ м/с}$   
3.20.  $10 \text{ м}$ .

### IV глава

- 4.1.  $0,5 \text{ с}$ .  
4.2.  $20 \text{ А}$ .  
4.3.  $1,5 \text{ Гц}; \approx 0,67 \text{ с}; 9 \text{ Гц}$ .  
4.4.  $100 \text{ колебаний}; 5 \text{ Гц}; 30 \text{ Гц}$ .  
4.5.  $a = -3,2?$   
4.6.  $x = 0,2 \sin 12t$ .  
4.7.  $14,4 \text{ Н/м}$ .  
4.8.  $0,75 \text{ с}$ .  
4.9.  $2,4 \text{ мм}$ .  
4.10.  $x = 0,05 \cos(15t + 0,75)\text{м}$ .  
4.11.  $4,5 \text{ м}; 2 \text{ Гц}$ .  
4.12.  $\frac{3}{4}\pi$ .  
4.13.  $0,1875 \text{ м/с}$ .  
4.14.  $0,0075 \text{ м/с}^2$ .  
4.15.  $12 \text{ м/с}^2$ .  
4.16.  $16 \text{ м}$ .  
4.17.  $12 \text{ м}; 0,05 \text{ с}; 20 \text{ Гц}$ .  
4.18.  $11 \text{ м}$ .  
4.19.  $8 \text{ м}$ .  
4.20.  $2 \text{ Гц}$ .

## V глава

- 5.1.  $\approx 29$  лет
- 5.2.  $\approx 0,92 \cdot c$
- 5.3.  $\approx$  в возрасте 41 лет
- 5.4.  $\approx 1,3$  м
- 5.5. Поперечный размер не изменяется, а длина укорачивается на 2 м.
- 5.6.  $9 \cdot 10^{-31}$  кг
- 5.7.  $10,251 \cdot 10^{-11}$  Дж
- 5.8.  $25,5 \cdot 10^{-11}$  Дж
- 5.9.  $0,6 \cdot 10^9$  тонн
- 5.10.  $c$

## VI глава

- 6.1.  $1,2 \cdot 10^{24}$
- 6.2. 5 моль
- 6.3.  $3,3 \cdot 10^{-27}$  кг;  $5,3 \cdot 10^{-26}$  кг
- 6.4.  $M = 0,16 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$ ;  $m_0 = 2,7 \cdot 10^{-25}$  кг
- 6.5.  $2,3 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$
- 6.6.  $5,6 \cdot 10^{-21}$  Дж
- 6.7. В первом случае, да. Во втором случае – замкнут, однако не изолирован.
- 6.8. Нет, в начале между телами теплообмен не происходит. Да, равенство температуры смеси температуре воздуха в комнате говорит, что между ними возникло тепловое равновесие.
- 6.9. Нет, система не находилась в тепловом равновесии.
- 6.10.  $927^\circ\text{C}$
- 6.11. При температуре выше  $647 \text{ K}$
- 6.12. При температуре  $150 \text{ K}$  – жидкость, при  $190 \text{ K}$  – газ.
- 6.13. Часть  $1 \rightarrow 6$  соответствует изотермическому сжатию, а часть  $1 \rightarrow 3$  – изотермическому расширению.
- 6.14. Часть  $1 \rightarrow 2$  соответствует изохорному охлаждению, а часть  $1 \rightarrow 5$  – изохорному нагреванию.
- 6.15. Часть DA
- 6.16.  $6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$
- 6.17.  $3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$
- 6.18. Увеличилось в 0,7 раза
- 6.19.  $5 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
- 6.20.  $840 \text{ Па}$
- 6.21.  $13 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$
- 6.22.  $180 \text{ кДж}$
- 6.23.  $0,25 \text{ мм}$
- 6.24.  $10,8 \text{ мм}^3$
- 6.25.  $0,043 \text{ г}$

6.26.  $\sigma_{\text{масло}} = 31,8 \frac{\text{мН}}{\text{м}}$

6.27. Разными физическими свойствами в разных направлениях внутри вещества

6.28. По числу и форме углов между сторонами

## VII глава

- 7.1.  $20 \text{ K}$
- 7.2.  $10 \text{ кДж}$
- 7.3.  $5 \cdot 10^5 \text{ Па}$
- 7.4. Уменьшилось на  $20 \text{ кДж}$
- 7.5. На части  $1 - 2$  увеличилось 3 раза;  
На части  $2 - 3$  не изменилось
- 7.6. На части  $1 - 2$  не изменилось;  
На части  $2 - 3$  увеличилось 3 раза
- 7.7.  $2p_0V_0$
- 7.8.  $U = \frac{3}{2}pV$ ;  $\Delta U = U_c - U_a =$   
 $= \frac{3}{2}(4p_0V_0 - p_0V_0) = \frac{9}{2}p_0V_0.$
- 7.9. а) увеличилось на  $3 \text{ кДж}$ ; б)  $2,4$  моль
- 7.10.  $0,3 \text{ кДж}$



### *Источники*

1. Əhmədov F.A. Mexanika və molekulyar fizika. Bakı, 2007, 387s.
2. Əsgərov B.M. Termodinamika və statistik fizika, Bakı, BDU, 2005, 625 s.
3. Eyvazov E.Ə., Qurbanov S.Ş., Xəlilov Ş.X. Molekulyar fizika və termodinamikaya giriş. Bakı, 2010.
4. Qocayev N.M. Ümumi fizika kursu, 2 cildə. 1-ci cild, Mexanika, Bakı, Qafqaz Universiteti, 2007, 408 s.
5. Qocayev N.M. Ümumi fizika kursu, 2 cildə. 2-ci cild, Molekulyar fizika. Bakı, Qafqaz Universiteti, 2008, 432 s.
6. Савельев В.И. Курс общей физики. Т. 1,2,3, Москва, Высшая школа, 2006.
7. Матвеев А.Н. Молекулярная физика. М.: Высшая школа, 1981, 400с.
8. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. Механика. М.: Высшая школа, 1973, 384 с.
9. Иванов С.А., Иванов А.Е. Механика. Молекулярная физика и термодинамика.М.: КноРус, 2012, 950 с.
10. Иродов И.Е. Механика. Основные законы. М.: Гостехиздат, 2010, 251 с.

BURAXILIŞ MƏLUMATI

**FİZİKA – 10**

*Ümumtəhsil müəssisələrinin 10-cu sinifləri üçün  
Fizika fənni üzrə*

**DƏRSLİK**

*Rus dilində*

**Tərtibçi heyət:**

Müəlliflər

**Mirzəli İsmayıl oğlu Murquzov  
Rasim Rəşid oğlu Abdurazaqov  
Rövşən Mirzə oğlu Əliyev**

Dil redaktoru

**K.Cəfərli**

Nəşriyyat redaktoru

**K.Abbasova**

Bədii redaktor

**T.Məlikov**

Texniki redaktor

**Z.İsayev**

Dizayner

**T.Məlikov**

Rəssamlar

**M.Hüseynov, E.Məmmədov**

Korrektor

**O.Kotova**

© Azərbaycan Respublikası Təhsil Nazirliyi (qrif nömrəsi: 2022-081)

Müəlliflik hüquqları qorunur. Xüsusi icazə olmadan bu nəşri və yaxud onun hər hansı hissəsini yenidən çap etdirmək, surətini çıxarmaq, elektron informasiya vasitələri ilə yaymaq qanuna ziddir.

Hesab-nəşriyyat həcmi 9,3. Fiziki çap vərəqi 13. Səhifə sayı 208.

Kağız formatı 70×100<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Ofset kağızı. Məktəb qarnituru. Ofset çapı.

Tiraj 0. Pulsuz. Bakı – 2022.

Çap məhsulunu nəşr edən:

“Bakınəşr” (Bakı, H.Seyidbəyli küç., 30)

LAYIHƏ

# Pulsuz



## Əziz məktəbli !

Bu dərslik sizə Azərbaycan dövləti tərəfindən bir dərs ilində istifadə üçün verilir. O, dərs ili müddətində nəzərdə tutulmuş bilikləri qazanmaq üçün sizə etibarlı dost və yardımçı olacaq.

İnanırıq ki, siz də bu dərsliyə məhəbbətlə yanaşacaq, onu zədələnmələrdən qoruyacaq, təmiz və səliqəli saxlayacaqsınız ki, növbəti dərs ilində digər məktəbli yoldaşınız ondan sizin kimi rahat istifadə edə bilsin.

Sizə təhsildə uğurlar arzulayırıq!



LAYIHƏ