

## Группа 18. Физика

Дата: 29.10.2021

Уроки №21, 22

Тип урока: комбинированный урок

### Темы уроков:

Импульс материальной точки. Другая формулировка второго закона Ньютона.  
Закон сохранения импульса Решение задач по теме «Закон сохранения импульса».

*Задание:*

*Ознакомиться с текстом по теме урока. Написать в тетради краткий конспект. Ответить на контрольные вопросы. Решить задачи.*

---

### План конспекта:

1. Импульс материальной точки
  2. Закон сохранения импульса
  3. Реактивное движение
  4. Реактивные двигатели
  5. Освоение космического пространства
  6. Примеры решения задач
  7. Контрольные вопросы
  8. Задачи для самостоятельного решения
- 

### Импульс материальной точки. Закон сохранения импульса

Роль законов сохранения в механике, да и в других разделах физики огромна. *Во-первых*, они позволяют решать ряд практически важных задач, например, по первоначальному состоянию системы, не зная подробностей взаимодействия тел, определять её конечное состояние, зная скорости тел до взаимодействия, определять скорости этих тел после взаимодействия. *Во-вторых*, и это главное, открытые в механике законы сохранения играют в природе огромную роль, далеко выходящую за рамки самой механики. Они применимы как к телам обычных размеров, так и к космическим телам и элементарным частицам.

Вспомните, что такое импульс материальной точки.

С направлением какой из перечисленных величин совпадает направление импульса — силы, скорости или ускорения?

Второй закон Ньютона  $m\vec{a} = \vec{F}$  можно записать в иной форме, которая приведена самим Ньютоном в его главном труде «Математические начала натуральной философии».

Если на материальную точку действует постоянная сила, то постоянным будет и ускорение тела  $\vec{a} = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{\Delta t}$ , где  $\vec{v}_1$  и  $\vec{v}_2$  — начальное и конечное значения скорости материальной точки. Подставив это значение ускорения во второй закон Ньютона, получим

$$\frac{m(\vec{v}_2 - \vec{v}_1)}{\Delta t} = \vec{F},$$

или

$$m\vec{v}_2 - m\vec{v}_1 = \vec{F} \Delta t. \quad (4.1)$$

#### ИНТЕРЕСНО

Импульс материальной точки — это физическая величина, равная произведению массы материальной точки на её скорость:

$$\vec{p} = m\vec{v}. \quad (4.2)$$

Из формулы (4.2) видно, что *импульс — векторная величина*. Так как  $m > 0$ , то импульс имеет такое же направление, как и скорость (рис. 4.1).



Обозначим через  $\vec{p}_1 = m\vec{v}_1$  импульс материальной точки в начальный момент времени, а через  $\vec{p}_2 = m\vec{v}_2$  — её импульс в конечный момент времени. Тогда разность  $\vec{p}_2 - \vec{p}_1 = \Delta\vec{p}$  есть изменение импульса материальной точки за время  $\Delta t$ . Уравнение (4.1) можно записать так:

$$\Delta\vec{p} = \vec{F} \Delta t.$$

Так как  $\Delta t > 0$ , то направления векторов  $\Delta\vec{p}$  и  $\vec{F}$  совпадают. Уравнение (4.3) показывает, что одинаковые изменения импульса могут быть получены в результате действия большой силы в течение малого интервала времени или малой силы за большой промежуток времени.

#### Запомни

Произведение силы на время её действия называют **импульсом силы**.

**Второй закон Ньютона в импульсной форме**  
Изменение импульса материальной точки равно импульсу действующей на неё силы.



Как определить импульс переменной силы?

Единица импульса не имеет особого названия, а её наименование получается из определения этой величины (см. формулу (4.2)):

$$1 \text{ ед. импульса} = 1 \text{ кг} \cdot 1 \text{ м/с} = 1 \text{ кг} \cdot \text{м/с}.$$

Для нахождения импульса тела, которое нельзя считать материальной точкой, поступают так: мысленно разбивают тело на отдельные малые элементы (материальные точки), находят импульсы полученных элементов, а потом суммируют их как векторы.

#### Интересно

Поставьте на лист бумаги банку с водой. Дёрните лист с большой силой так, чтобы он выскользнул из-под банки, а банка при этом осталась бы на месте. Затем потяните лист так, чтобы банка двигалась вместе с листом. Сравните время действия сил. Объясните, почему в первом случае банке не сообщается импульс, а во втором сообщается.

#### Важно

Импульс тела равен сумме импульсов его отдельных элементов.

Импульс системы тел равен векторной сумме импульсов каждого из тел системы:  $\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots$ . Систему тел составляют взаимодействующие тела, движение которых мы рассматриваем.

**Закон сохранения импульса.** Пусть система состоит из двух тел. Это могут быть две звезды, два бильярдных шара или два других тела.

#### Запомни

Силы, возникающие в результате взаимодействия тела, принадлежащего системе, с телом, не принадлежащим ей, называются **внешними силами**.

Если рассматривать систему, состоящую из двух бильярдных шаров, то сила взаимодействия шаров с краем стола при ударе о него, сила трения шара о поверхность стола — внешние силы. Пусть на тела некоторой системы действуют внешние силы  $F_1$  и  $F_2$  (рис. 4.2).



Обсудите с одноклассником, в каком случае импульс системы движущихся тел может быть равен нулю.

#### Запомни

Силы, возникающие в результате взаимодействия тел, принадлежащих системе, называются **внутренними силами**.



Рассмотрите с одноклассником взаимодействие двух любых тел. Укажите силы, действующие на тела, и уточните, какие из них являются внешними, а какие — внутренними.

Обозначим внутренние силы через  $\vec{F}_{1,2}$  и  $\vec{F}_{2,1}$  (см. рис. 4.2).

Вследствие действия сил на тела системы их импульсы изменяются. Если взаимодействие рассматривается за малый промежуток времени  $\Delta t$ , то для тел системы можно записать второй закон Ньютона в виде



$$\Delta \vec{p}_1 = (\vec{F}_1 + \vec{F}_{1,2})\Delta t, = (\vec{F}_2 + \vec{F}_{2,1})\Delta t$$

Сложив эти равенства, получим

$$\Delta \vec{p}_1 + \Delta \vec{p}_2 = (\vec{F}_1 + \vec{F}_2)\Delta t + (\vec{F}_{1,2} + \vec{F}_{2,1})\Delta t. \quad (4.4)$$

В левой части равенства (4.4) стоит сумма изменений импульсов всех тел системы, т. е. изменение импульса самой системы (под импульсом системы мы будем понимать геометрическую сумму импульсов всех тел системы):

$$\Delta \vec{p}_{\text{сист}} = \Delta \vec{p}_1 + \Delta \vec{p}_2$$

По третьему закону Ньютона  $\vec{F}_{1,2} = -\vec{F}_{2,1}$ . Отсюда следует, что сумма внутренних сил всегда равна нулю:

$$\vec{F}_{1,2} + \vec{F}_{2,1} = 0. \quad (4.6)$$

Учитывая равенства (4.4) и (4.6), можно записать:

$$\Delta \vec{p}_{\text{сист}} = (\vec{F}_1 + \vec{F}_2)\Delta t, \Delta \vec{p}_{\text{сист}} = \vec{F} \Delta t. \quad (4.7)$$

где  $\vec{F}$  — геометрическая сумма всех внешних сил, действующих на тела системы.

Мы доказали весьма важное положение:

**Важно**

импульс системы тел могут изменить только внешние силы, причем изменение импульса системы  $\Delta p_{\text{сист}}$  совпадает по направлению с суммарной внешней силой.

Внутренние силы изменяют импульсы отдельных тел системы, но изменить суммарный импульс системы они не могут.

Уравнение (4.7) справедливо для любого интервала времени  $\Delta t$ , если сумма внешних сил остаётся постоянной.

Из уравнения (4.7) вытекает *закон сохранения импульса*.

**Закон**

**сохранения**

**импульса**

Если внешние силы на систему не действуют или их сумма равна нулю, то импульс системы сохраняется:

$$\Delta \vec{p}_{\text{сист}} = 0, \text{ или } \vec{p}_{\text{сист}} = \text{const.}$$

Полученный результат справедлив для системы, содержащей произвольное число тел:

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 + m_3 \vec{v}_3 + \dots = m_1 \vec{u}_1 + m_2 \vec{u}_2 + m_3 \vec{u}_3 + \dots \quad (4.9)$$

где  $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{v}_3, \dots$  — скорости тел до взаимодействия;  $\vec{u}_1, \vec{u}_2, \vec{u}_3, \dots$  — скорости тел после взаимодействия.

Импульс, очевидно, сохраняется в изолированной системе тел, так как в этой системе на тела вообще не действуют внешние силы. Но область применения закона сохранения импульса шире.

- 1) Если даже на тела системы действуют внешние силы, но их сумма равна нулю, то импульс системы всё равно сохраняется.
- 2) Если сумма внешних сил не равна нулю, но сумма проекций сил на какое-то направление равна нулю, то проекция суммарного импульса системы на это направление не меняется.
- 3) Если внешние силы много меньше внутренних сил, то можно считать, что импульс системы сохраняется. Например, при разрыве снарядов силы,рывающие снаряд, много больше внешней силы тяжести.

**Реактивное движение.** Большое значение закон сохранения импульса имеет для исследования реактивного движения.

#### Запомни

**Реактивным движением** называют движение тела, возникающее при отделении некоторой его части с определённой скоростью относительно него.

Примером реактивного движения является движение ракеты при истечении из неё струи горючего газа, образующегося при сгорании топлива.

#### Запомни

Так как вследствие истечения струи ракета движется с ускорением, то можно считать, что на ракету действует сила, называемая **реактивной силой**.



Понаблюдайте за движением воздушного шарика, из которого истекает воздух, и объясните, почему шарик, как правило, движется по кривой. Как изменяется скорость шарика?

Главная особенность реактивной силы в том, что она возникает в результате взаимодействия частей системы без какого-либо взаимодействия с внешними телами.



**Реактивные двигатели.** В настоящее время в связи с освоением космического пространства получили широкое распространение реактивные двигатели.

В космическом пространстве использовать какие-либо другие двигатели, кроме реактивных, невозможно, так как там нет опоры (твёрдой, жидкой или газообразной), отталкиваясь от которой космический корабль мог бы получать ускорение.

**Успехи в освоении космического пространства.** Основы теории реактивного двигателя и научное доказательство возможности полётов в межпланетном пространстве были впервые высказаны и разработаны русским учёным К. Э. Циолковским в работе

«Исследование мировых пространств реактивными приборами». Нашей стране принадлежит великая честь запуска 4 октября 1957 г. первого искусственного спутника Земли, а 12 апреля 1961 г. космического корабля с космонавтом Ю. А. Гагариным на борту.

Этот и другие полёты были совершены на ракетах, сконструированных отечественными учёными и инженерами под руководством С. П. Королёва.

Большой вклад в исследование космического пространства внесли также американские учёные, инженеры и астронавты. Два американских астронавта из экипажа космического корабля «Аполлон-11» — Н. Армстронг и Э. Олдрин — 20 июля 1969 г. впервые совершили посадку на Луну. На космическом теле Солнечной системы человеком были сделаны первые шаги.

С выходом человека в космос не только открылись возможности исследования других планет, но и представились поистине фантастические возможности изучения природных явлений и ресурсов Земли, о которых можно было только мечтать. Теперь снимки с орбиты, охватывающие миллионы квадратных километров, позволяют выбирать для исследования наиболее интересные участки земной поверхности, экономя тем самым силы и средства.



Освоение космоса имеет огромное практическое значение. Нас уже не удивляет, что мы можем заглянуть практически в каждый уголок Земли, поговорить с человеком, находящимся на другом континенте, благодаря космической (спутниковой) связи.

В настоящее время можно в режиме онлайн смотреть, что происходит в космосе благодаря телескопам, вращающимся по орбитам вокруг Земли.

#### ИНТЕРЕСНО

Орбитальные аппараты в настоящее время используются не только для научных исследований космического пространства, но и для биологических, медицинских исследований, получения новых материалов.

### Примеры решения задач по теме «Закон сохранения импульса»

Закон сохранения импульса целесообразно применять для решения тех задач, в которых требуется определить скорость, а не силу или ускорение.

Для решения задачи нужно записать этот закон в векторной форме:

$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 + \dots = m_1 \vec{u}_1 + m_2 \vec{u}_2 + \dots$ , где  $\vec{v}_1, \vec{v}_2$  и т. д. — скорости тел системы до взаимодействия, а  $\vec{u}_1, \vec{u}_2$  и т. д. — их скорости после взаимодействия.

После этого векторное уравнение записывается в проекциях на оси выбранной системы координат. Выбор направления осей диктуется удобством решения задачи. Если, например, все тела движутся вдоль одной прямой, то координатную ось целесообразно направить вдоль этой прямой.

При решении некоторых задач приходится использовать дополнительно уравнения кинематики.

**Задача 1.** Два шара, массы которых  $m_1 = 0,5$  кг и  $m_2 = 0,2$  кг, движутся по гладкой горизонтальной поверхности навстречу друг другу со скоростями  $v_1 = 1$  м/с и  $v_2 = 4$  м/с. Определите их скорость  $v$  после центрального абсолютно неупругого столкновения.

**Запомни**

**Абсолютно неупругим столкновением** называется взаимодействие тел, после которого они движутся как единое целое с одной скоростью.

**Решение.** Ось ОХ направим вдоль линии, проходящей через центры движущихся шаров по направлению скорости  $\vec{v}_1$ .

После абсолютно неупругого удара шары движутся с одной и той же скоростью  $\vec{v}$ . Так как вдоль оси ОХ внешние силы не действуют (трения нет), то сумма проекций импульсов на эту ось сохраняется (сумма проекций импульсов обоих шаров до удара равна проекции общего импульса системы после удара):

$$m_1 v_{1x} + m_2 v_{2x} = (m_1 + m_2) v_x.$$

Так как  $v_{1x} = v_1$ , а  $v_{2x} = -v_2$ , то

$$v_x = (m_1 v_1 - m_2 v_2) / (m_1 + m_2) \approx -0,4 \text{ м/с.}$$

После удара шары будут двигаться в отрицательном направлении оси ОХ со скоростью 0,4 м/с.

**Задача 2.** Два пластилиновых шарика, отношение масс которых  $m_2/m_1 = 4$ , после соударения слиплись и стали двигаться по гладкой горизонтальной поверхности со скоростью  $u$  (рис. 4.3, вид сверху). Определите скорость более лёгкого шарика до соударения, если он двигался в 3 раза быстрее тяжёлого ( $v_1 = 3v_2$ ), а направления движения шариков были взаимно перпендикулярны. Трением можно пренебречь.



**Решение.** Так как скорости  $\vec{v}_1$  и  $\vec{v}_2$  шариков взаимно перпендикулярны, то оси прямоугольной системы координат удобно направить параллельно этим скоростям.

Согласно закону сохранения импульса имеем

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = (m_1 + m_2) \vec{u}.$$

Запишем это уравнение в проекциях на оси ОХ и ОУ, проведённые так, как показано на рисунке 4.3:

$$\begin{aligned} m_1 v_{1x} + m_2 v_{2x} &= (m_1 + m_2) u_x, \\ m_2 v_{1y} + m_2 v_{2y} &= (m_1 + m_2) u_y. \end{aligned}$$

Так как  $v_{1x} = v_1$ ,  $v_{2x} = 0$ ,  $v_{1y} = 0$ ,  $v_{2y} = v_2$ , то

$$u_x = \frac{m_1 v_1}{m_1 + m_2} = \frac{3}{5} v_2, \quad u_y = \frac{m_2 v_2}{m_1 + m_2} = \frac{4}{5} v_2.$$

$$u = \sqrt{u_x^2 + u_y^2} = v_2.$$

Модуль скорости и равен

Итак,  $v_2 = u$ , следовательно,  $v_1 = 3u$ .

Можно эту задачу решить так. Импульсы  $\vec{p}_1$  и  $\vec{p}_2$  тел взаимно перпендикулярны, поэтому согласно закону сохранения импульса и теореме Пифагора  $(m_1 v_1)^2 + (m_2 v_2)^2 = (m_1 + m_2)^2 u^2$ .

Тогда 
$$u = \frac{\sqrt{(m_1 v_1)^2 + (m_2 v_2)^2}}{(m_1 + m_2)} = \frac{m_1 v_2 \sqrt{3^2 + 4^2}}{5m_1} = v_2,$$
 и, следовательно,  $v_1 = 3u$ .

**Задача 3.** Компоненты топлива в двигатель ракеты подаются со скоростью  $v_1 = 200$  м/с, а горячий газ выходит из сопла со скоростью  $v_2 = 500$  м/с.

Массовый расход топлива двигателем  $\frac{\Delta m}{\Delta t} = 30$  кг/с. Определите реактивную силу.

**Решение.** Изменение импульса топлива массой  $\Delta m$  за время  $\Delta t$  равно

$$\Delta m v_2 - \Delta m v_1 = F \Delta t.$$

Тогда сила, действовавшая на горячий газ, вырывающийся из сопла ракеты,

$$F = \frac{\Delta m}{\Delta t} (v_2 - v_1).$$

Согласно третьему закону Ньютона сила, действовавшая на топливо, равна по модулю и противоположна по направлению силе, действовавшей на ракету, т. е. реактивной силе  $\vec{F} = -\vec{F}_p$ . Следовательно, искомая сила

$$F_p = \frac{\Delta m}{\Delta t} (v_2 - v_1) = 9000 \text{ Н.}$$

---

### Контрольные вопросы:

1. Точка движется равномерно по окружности. Изменяется ли её импульс?
2. Как определяется импульс тела?
3. Автомобиль трогается с места. Куда направлен вектор изменения импульса?
4. Хоккейная шайба скользит прямолинейно и замедленно. Куда направлен вектор изменения импульса?

5. Сформулируйте закон сохранения импульса.
6. В каких случаях можно применять закон сохранения импульса?
7. В лежащий на гладком столе брусок попадает пуля, летящая горизонтально. Почему для нахождения скорости бруска с пулей можно применять закон сохранения импульса, хотя на брусок и пулю действуют внешние силы: сила тяжести, нормальная сила реакции стола?
8. Может ли парусная лодка приводиться в движение с помощью компрессора, установленного на ней, если струя воздуха направлена на паруса? Что произойдёт, если поток воздуха будет направлен мимо парусов?
9. Как возникает реактивная сила?
10. осьминоги и каракатицы перемещаются со скоростью до 60 км/ч, периодически выбрасывая вбираемую в себя воду. По какому принципу перемещаются эти животные?

### *Задачи для самостоятельного решения*

---

1. неподвижный вагон массой  $2 \cdot 10^4$  кг сцепляется с платформой массой  $3 \cdot 10^4$  кг. До сцепки платформа имела скорость 1 м/с. Чему равна скорость вагона и платформы после их сцепки?
2. На плот массой 100 кг, имеющий скорость 1 м/с, направленную вдоль берега, прыгает человек массой 50 кг со скоростью 1,5 м/с перпендикулярно берегу. Определите скорость плота с прыгнувшим на него человеком.
3. Будет ли увеличиваться скорость ракеты, если скорость истечения газов относительно ракеты меньше скорости самой ракеты и вытекающие из сопла газы летят вслед за ракетой?
4. Охотник стреляет с лёгкой надувной лодки. Определите скорость лодки после выстрела, если масса охотника 70 кг, масса дроби 35 г и средняя начальная скорость дробинок равна 320 м/с. Ствол ружья во время выстрела образует с горизонтом угол  $60^\circ$ .

-----

### **Литература:**

Мякишев Г. Я. Физика 10 класс. Учебник для общеобразовательных учреждений. М., 2010. §§ 39,40 стр. 112-114