Лекция 2. «Закон сохранения импульса».

Силы. Инерциальная система отсчета. Динамика материальной точки. Механическая система и ее центр масс. Уравнение изменения импульса механической системы. Закон сохранения импульса.

Определение. *Вектором импульса материальной точки* называется вектор $\vec{p} = m\vec{v}$. Единица измерения кг·м/с. Вектор импульса направлен также как и вектор скорости – по касательной к траектории. Иногда импульс называют *количеством движения*.

Если импульс точки изменился, то говорят, что на материальную точку было оказано воздействие со стороны внешних тел. Это воздействие называется *импульсом силы*.

Силы в механике.

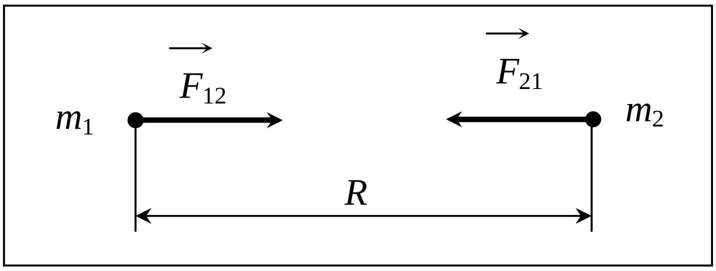
Сила – величина являющаяся мерой механического действия на данное материальное тело со стороны других тел. Это действие приводит к изменению импульсов точек тела, их смещению из положений равновесия (деформации тела). В механике принято рассматривать взаимодействие тел при непосредственном контакте, а также взаимодействие на расстоянии посредством полей, создаваемых телами. Сила – векторная величина, характеризуемая величиной, направлением и точкой приложения. Действия с силами, приложенными к одной точке, производятся в соответствие с правилами действий с векторами.

В классической механике силы не меняются при переходе от одной системы отсчета к другой.

Основные примеры сил в механике.

1.Сила всемирного тяготения.

Закон всемирного тяготения Ньютона: *две материальные точки, массы которых m_1 и m_2, находящиеся друг от друга на расстоянии R, взаимно притягиваются с силой, прямо зависящий от произведения масс точек и обратно зависящей*



от квадрата расстояния между ними. Силы точек лежат на линии, соединяющей эти точки. Величина силы определяется по формуле:

$$F_{\text{гр}} = G\frac{m_1 m_2}{R^2}.$$

Константа G≈$6{,}67\cdot10^{-11}$ Н·м^2/кг^2 называется *гравитационной постоянной*.

Для двух однородных сфер или шаров сила гравитационного взаимодействия определяется таким же соотношением, только в этом случае берется *расстояние R между их центрами*.

2. Сила тяжести.

Рассмотрим какое-нибудь тело массы m, находящееся *вблизи* поверхности Земли. Если тело имеет размеры соизмеримые с размерами человека (автомобиль, дом, мост и т.д.), то его можно рассматривать как материальную точку по сравнению с Землей (как планетой). Планету Земля можно приближенно считать однородным шаром. Следовательно, для взаимодействия тела с Землей можно применить закон всемирного тяготения. При этом перепишем его немного в другом виде

$$F_{\text{ГР}} = mG\frac{M_{\text{ЗЕМЛИ}}}{\left(R_{\text{ЗЕМЛИ}} + h\right)^2}.$$

Здесь $M_{\text{ЗЕМЛИ}}$ – масса планеты Земля, $R_{\text{ЗЕМЛИ}} \approx 6400$ км = 6 400 000 м – средний радиус планеты Земля, h - высота, на которой находится тело над Землей. Введем обозначение

$$g = G\frac{M_{\text{ЗЕМЛИ}}}{\left(R_{\text{ЗЕМЛИ}} + h\right)^2}.$$

Если тело находится на сравнительно *небольшой* высоте над поверхностью Земли (по отношению к радиусу Земли), то в знаменателе можно приближенно считать, что $R_{\text{ЗЕМЛИ}} + h \approx R_{\text{ЗЕМЛИ}}$, поэтому для тела, находящегося вблизи поверхности Земли величина $g = G\frac{M_{\text{ЗЕМЛИ}}}{\left(R_{\text{ЗЕМЛИ}}\right)^2}$ остается практически постоянной и равной $g \approx 9{,}81$ м/с^2.

Следовательно, величину силы гравитации, действующей на тело массы m вблизи поверхности Земли можно определить соотношением

$$F_{\text{ГР}} = mg.$$

Вектор силы, приложенный к телу, направлен к <u>центру</u> Земли. В этом случае силу гравитации называют *силой тяжести*. В задачах, где поверхность Земли можно приближенно считать плоской, вектор силы тяжести *всегда* направлен *вниз к земле*.

3. Сила (нормальной) реакции опоры.

Если два тела находятся в соприкосновении, то между ними, вообще говоря, действуют силы взаимной реакции, вызванные этим соприкосновением. При прекращении соприкосновения эти силы исчезают. Эти силы называют силами *реакции опоры*. Сила, действующая перпендикулярно поверхности соприкасающихся тел и приложенная в точке соприкосновения тел называется силой *нормальной реакции опоры*.

Весом тела называется сила нормальной реакции, с которой тело давит на *горизонтальную* поверхность или подвес.

4. Сила натяжения нити.

При попытке сжать нить она начнет провисать, т.е. она не сопротивляется сжатию. Однако при растяжении она натягивается, т.е. она сопротивляется растяжению. Точно так же при попытке изогнуть нить она начнет прогибаться – т.е. нить не сопротивляется изгибу. Следовательно, сила, возникающая в нити при ее растяжении должна быть *растягивающей* и *направленной вдоль нити*. Эту силу называют *силой натяжения нити*.

5. Сила (сухого) трения.

Сила (сухого) трения возникает между *соприкасающимися* телами при попытке сдвинуть их друг относительно друга. Одной из причин возникновения силы трения является неровность поверхностей тел, взаимная деформация точек поверхностей и т.д. Сила трения всегда направлена так, чтобы *препятствовать относительному движению* соприкасающихся тел. Сила трения бывает двух видов – сила трения покоя и сила трения скольжения.

Сила трения покоя действует на покоящееся тело при попытке сдвинуть его.

Сила трения скольжения действует на тело, скользящее по поверхности другого тела. В классической механике величина силы трения скольжения *не зависит* от площади поверхности соприкасающихся тел, а определяется силой реакции опоры N между телами и (постоянным) коэффициентом трения (скольжения) μ:

$$F_{ТР}=\mu N.$$

6. Сила сопротивления движению тела в жидкости или газе.

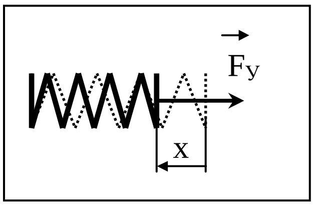
При движении тела в вязкой среде на него действует сила сопротивления движению. Сила сопротивления движению всегда направлена против *относительного* движения тела в жидкости или газе. Для сферических тел можно считать, что она приложена к центру сферы. Величина силы зависит от величины площади *поперечного* сечения тела S, а также от скорости тела V (относительно окружающей среды). В общем случае величину силы сопротивления можно представить в виде

$$\vec{F}_{СОПР}=-\alpha\cdot S\cdot \mathrm{v}^N\vec{e}_{\vec{\mathrm{v}}},$$

где α - коэффициент, зависящий от свойств жидкости и формы тела, показатель степени N определяется параметрами движения. При малых скоростях движения N=1 и выражение для силы можно представить в виде $\vec{F}_{СОПР}=-r\cdot\vec{V}$, где r > 0 – коэффициент сопротивления.

7. Сила упругости.

Деформацией тела называется изменение размеров тела под действием действующей на него силы. Величину деформации определяют как разность между размером тела при действующей на него силе L_1 и размером в свободном (ненагруженном состоянии) $x = L_1 – L$. *Направлением деформации* называется направление смещения точек тела относительно положения равновесия.



***Закон Гука*:** Сила упругости, возникающая в теле при *малой* деформации величиной *x*, прямо пропорциональна величине деформации и направлена противоположно ее направлению:

$$\vec{F}_{УПР} = -k\cdot\vec{x}.$$

Коэффициент k называется *коэффициентом упругости* (жесткости) и измеряется в Н/м.

Пример. Найдем общий коэффициент упругости для двух невесомых пружин *одинаковой* длины, жесткости которых равны k_1 и k_2, при их параллельном и последовательном соединениях.

При параллельном соединении: общая сила деформации равна сумме сил в каждой из пружин:

$$F = F_1 + F_2.$$

При параллельном соединении деформации пружин одинаковые: $x_1=x_2=x$.
Тогда: $k_{ОБЩ}x= k_1x_1 + k_2x_2$. Поэтому: $k_{ОБЩ}= k_1 + k_2$. *При параллельном соединении жесткости пружин суммируются*.
При последовательном соединении: в этом случае сила упругости *в любом* сечении пружин одинаковая! Действительно, если бы в двух рядом находящихся сечениях силы были бы разными, то часть пружины между этими двумя сечениями согласно второму закону Ньютона двигалась бы под действием разности этих сил, т.е. пружина продолжала бы деформироваться до тех пор, пока силы не станут равными по величине. Общая деформация пружин равна сумме деформаций каждой из них: $x_1+x_2=x_{ОБЩ}$
Отсюда:

$$\frac{F}{k_{ОБЩ}} = \frac{F}{k_1} + \frac{F}{k_2}$$

или $\frac{1}{k_{ОБЩ}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}$. *При последовательном соединении жесткости суммируются обратные величины.*

Обобщенный закон Гука.

Рассмотрим силу упругости в деформируемом стержне, площадь сечения которого S, а коэффициент жесткости k. Пусть L_0 – начальная длина стержня. Если стержень деформировался на величину ΔL, то величина силы упругости равна $F = k \cdot \Delta L$.
Определение. *Напряжением* (*нормальным напряжением*) в сечении называется отношение величины силы к площади поперечного сечения $\sigma = \frac{F}{S}$. Напряжение измеряется в Па (Паскалях.)
С учетом этого определения силу упругости можно представить в виде $F = \sigma \cdot S = k \cdot \Delta L = k \cdot L_0 \cdot \frac{\Delta L}{L_0}$, откуда $\sigma = \frac{k \cdot L_0}{S} \cdot \frac{\Delta L}{L_0}$.

Введем обозначения: пусть $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$ - относительная деформация (безразмерная величина), а $E = \frac{k \cdot L_0}{S}$. Коэффициент E называется *коэффициентом упругости* материала или *модулем Юнга* (измеряется в Па).
Тогда обобщенный закон Гука будет иметь вид: напряжение и относительная деформация прямо пропорциональны друг другу

$$\sigma = E \cdot \varepsilon .$$

Коэффициентом пропорциональности является модуль Юнга.

Законы Ньютона.

1-Й ЗАКОН НЬЮТОНА.

Формулировка закона: Существуют такие системы отсчета, в которых материальная точка либо покоится, либо движется по прямой с постоянной скоростью, если на нее не действуют силы со стороны других тел или (векторная) сумма сил равна нулю. Такие системы отсчет называются *инерциальными*.

Т.о. в *инерциальной* системе отсчета вектор скорости материальной точки не изменится, пока на точку не подействует сила со стороны другого тела.

Определения.

Свойство тела не изменять вектора своей скорости в отсутствие внешних сил называется *инертностью* тела. Движение тела, на которое не действуют силы, в инерциальной системе отсчета называется *движением по инерции*. *Масса* тела – это мера инертности тела. В классической физике масса тела равна сумме масс частей этого тела - говорят, что масса *аддитивная величина – т.е. суммируемая* величина. *В классической физике масса тела не зависит от системы отсчета*.

Замечание. Эксперименты показывают, что *инертная* масса равна *гравитационной*.

Замечание. Система отсчета, связанная с *неподвижной* Землей является неинерциальной ввиду вращения Земли (как планеты) вокруг оси, вокруг Солнца и т.д. Однако, *хотя система отсчета, связанная с Землей и не является инерциальной, в большом количестве задач ее можно считать инерциальной, что не приводит к большим погрешностям в решении.*

2-Й ЗАКОН НЬЮТОНА.

Формулировка закона**:** в *инерциальной* системе отсчета вектор ускорения материальной точки *сонаправлен* с вектором суммы сил, действующих на точку. Величина ускорения точки прямо пропорциональна величине равнодействующей всех сил и обратно пропорциональна массе точки:

$$\vec{a} = \frac{\sum \vec{F}}{m}.$$

Часто используют запись второго закона в виде: $\mathrm{m} \cdot \vec{a} = \sum \vec{\mathrm{F}}$.

Это три числовых уравнения в (декартовых) координатах: $\begin{cases} \mathrm{m} \cdot a_X = \sum \mathrm{F}_X \\ \mathrm{m} \cdot a_Y = \sum \mathrm{F}_Y \\ \mathrm{m} \cdot a_Z = \sum \mathrm{F}_Z \end{cases}$.

Второй закон Ньютона можно записать и в *импульсном* виде

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}$$

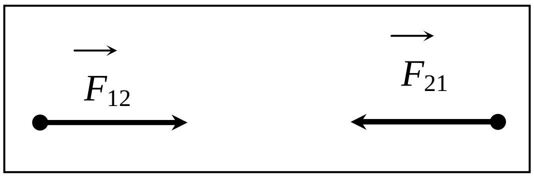
- *производная от вектора импульса материальной точки в инерциальной системе отсчета равна вектору суммарной силы, действующей на точку*.

Замечание. Требование инерциальности системы отсчета весьма существенно. Первый закон выделяет инерциальные системы отсчета как такие системы, в которых материальная точка, на которую не действуют внешние силы, движется без ускорения. При переходе от одной системы отсчета к другой, ускорение преобразуется по правилу $\vec{a}_1 = \vec{a}_2 + \vec{a}_{21}$ (см. выше), и если новая система движется относительно старой без ускорения $\vec{a}_{21} = \vec{0}$, то ускорения точки в этих системах отсчёта *одинаковые*. Поэтому во всех *инерциальных* системах отсчета второй закон Ньютона выглядит одинаково: $m\vec{a}_1 = m\vec{a}_2 = \sum \vec{F}$ (т.к. векторы сил не меняются при смене системы отсчёта).

Это равенство законов Ньютона в разных инерциальных системах отсчёта выражает собой принцип *относительности Галилея* для классической механики.

3-Й ЗАКОН НЬЮТОНА.

Формулировка закона. Две материальные точки действуют друг на друга с силами одинаковыми по величине, природе этих сил, и противоположными по направлению:



$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

Эти силы приложены к разным телам и лежат на одной прямой, проходящей через точки.

Три закона Ньютона дают рецепт для решения задач динамики.

Шаг 1. Выбираем инерциальную систему отсчета.

Шаг 2. Используя третий закон Ньютона, расставляем силы, действующие на материальную точку.

Шаг 3. Вводим систему координат. Находим векторную сумму этих сил либо явно, либо в проекциях на оси системы координат. Применяя второй закон Ньютона либо в векторной форме $m \cdot \vec{a} = \vec{F}$, либо в проекциях

$$\begin{cases} ma_X = \sum F_X \\ ma_Y = \sum F_Y \\ ma_Z = \sum F_Z \end{cases}$$

Находим ускорение точки. (Как правило, систему координат надо вводить таким образом, чтобы можно было *проще* решить систему уравнений для нахождения проекций ускорения.)

Шаг 4. По найденному ускорению определяем параметры движения, используя кинематические соотношения.

НЕИНЕРЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА.

При движении материальной точки относительно инерциальной системы второй закон Ньютона имеет вид:

$$m\vec{a} = \sum \vec{F},$$

где $\vec{a}$ - ускорение тела *относительно* инерциальной системы. Формально второй закон Ньютона связывает *вектор ускорения в* <u>*данной*</u> *системе отсчета* и вектор суммы всех сил, действующих на тело.

Рассмотрим систему отсчета, которая движется относительно некоторой инерциальной системы с ускорением $\vec{a}_C$, и следовательно, она уже *не является инерциальной*. Тогда ускорение тела в неинерциальной системе можно найти как разность ускорений $\vec{a}_1 = \vec{a} - \vec{a}_C$ или $\vec{a} = \vec{a}_C + \vec{a}_1$. Подставим это выражение в уравнение второго закона относительно инерциальной системы $m\left(\vec{a}_C + \vec{a}_1\right) = \sum \vec{F}$. Если последнее равенство переписать в виде

$$m\vec{a}_1 = \sum \vec{F} - m\vec{a}_C ,$$

то это выражение ФОРМАЛЬНО совпадает со вторым законом Ньютона, т.к. оно связывает ускорение точки в системе отсчёта с некоторой суммой векторов, имеющей размерность силы. Только в правой части векторного равенства появилось дополнительное слагаемое $\vec{F}_{ИН} = -m\vec{a}_C$, которое называется *силой инерции*. Знак минус показывает, что вектор этой силы направлен *против вектора ускорения системы отсчета*. Это *фиктивная* сила, в том смысле, что нет тел, которые создают эту силу и она пропадает при переходе к инерциальной системе отсчета. Иногда говорят, что инерциальные системы отсчета – это такие системы, в которых силы инерции равны нулю. (По современным представлениям силы инерции создаются всеми телами в нашей Вселенной.)

ДВИЖЕНИЕ СИСТЕМЫ ТОЧЕК.

Во многих задачах тело нельзя рассматривать как материальную точку, поэтому приходится рассматривать его как систему материальных точек, взаимодействующих друг с другом и с другими телами. При описании движения такой системы, состоящей, например, из N точек, необходимо описать движение каждой точки с учетом всех сил, действующих на нее. Так как для любой точки имеется три уравнения движения (вдоль каждой из осей декартовой системы координат), то общее количество уравнений равно $3N$. При увеличении числа N трудоемкость описания движения возрастает многократно. При этом необходимо учитывать также силы, действующие между точками системы (такие силы называют *внутренними*). Иногда такие силы даже нельзя точно описать. Также на точки системы действуют силы со стороны тел, не входящих в систему (такие силы принято называть *внешними*). Все это в совокупности приводит к значительному увеличению трудоёмкости описания движения.

Кроме того, существуют объективные ограничения на возможность (аналитического) моделирования движения системы тел – например, задача описания движения *трех* (всего-то!) тел уже не может быть решена в общем виде!

Поэтому для моделирования движения системы весьма полезным является понятие центра масс. Оказывается, что для каждой системы точек существует *особая* точка, ускорение которой определяется только внешними силами – эта точка называется *центром масс системы*.

Центр масс.

Рассмотрим, для простоты, систему из *двух* материальных точек. Запишем уравнения движения для каждой из них (второй закон Ньютона)

$$\begin{cases} m_1\vec{a}_1 = \vec{F}_1 \\ m_2\vec{a}_2 = \vec{F}_2 \end{cases}$$

Силы, действующие на точку можно разделить на две группы:

1. силы, действующие со стороны другой точки (их называют *внутренними* по отношению к системе)
2. силы, действующие со стороны тел, не входящих в систему (их называют *внешними*).

$$\begin{cases} m_1\vec{a}_1 = \vec{F}_1^{\text{ВНЕШ}} + \vec{F}_1^{\text{ВНУТР}} \\ m_2\vec{a}_2 = \vec{F}_2^{\text{ВНЕШ}} + \vec{F}_2^{\text{ВНУТР}} \end{cases}$$

Теперь сложим эти уравнения. Тогда *внутренние* силы, по третьему закону Ньютона, взаимно компенсируются, останутся только *внешние*. Векторную сумму внешних сил обозначим как $\vec{F}^{\text{ВНЕШ}}$. В итоге, получаем:

$$m_1\vec{a}_1 + m_2\vec{a}_2 = \vec{F}^{\text{ВНЕШ}}.$$

Введем новый радиус-вектор, который называется ***радиус-вектором центра масс системы***:

$$\vec{R}_C = \frac{m_1\vec{R}_1 + m_2\vec{R}_2}{m_1 + m_2}.$$

Этот радиус-вектор определяет некоторую точку, которая называется *центром масс системы*. Здесь m_1, m_2 – массы точек системы, $\vec{R}_1, \vec{R}_2$ - их радиус-векторы. В знаменателе этого выражения стоит суммарная масса всех точек системы – ее называют ***массой системы***

$$m_C = m_1 + m_2.$$

Продифференцируем по времени (помним, что производная от радиус-вектора по времени равна вектору скорости) и получим вектор скорости центра масс:

$$\vec{V}_C = \frac{m_1\vec{V}_1 + m_2\vec{V}_2}{m_C},$$

и, аналогично, ускорение центра масс: $\vec{a}_C = \dfrac{m_1\vec{a}_1 + m_2\vec{a}_2}{m_C}$.

Поэтому уравнение движения системы точек будет иметь вид:

$$m_1\vec{a}_1 + m_2\vec{a}_2 = m_C\vec{a}_C = \vec{F}^{\text{ВНЕШ}} \text{ или } \vec{a}_C = \frac{\vec{F}^{\text{ВНЕШ}}}{m_C}$$

Центр масс системы (тела) – это точка, масса которой равна массе всей системы (тела), а вектор ускорения (в инерциальной системе отсчета) определяется только внешними силами, действующими на систему (тело). Поэтому при нахождении закона движения системы точек можно считать, что *вектор равнодействующей внешних сил приложен к центру масс системы (тела).*

Следствия

1) Радиус-вектор центра масс системы точек $\vec{R}_C = \dfrac{\sum_i m_i\vec{R}_i}{m}$. Для сплошного тела

$$\vec{R}_C = \frac{\int_m \vec{R}dm}{m}.$$

2) Скорость центра масс $\vec{V}_C = \dfrac{\sum_i m_i\vec{V}_i}{m_C}$. Для сплошного тела $\vec{V}_C = \dfrac{\int_m \vec{V}dm}{m}$.

3) Ускорение центра масс $\vec{a}_C = \dfrac{\sum_i m_i\vec{a}_i}{m_C}$. Для сплошного тела $\vec{a}_C = \dfrac{\int_m \vec{a}dm}{m}$.

4) Правила для нахождения центра масс системы.

- Если у системы (тела) есть ось симметрии, то центр масс находится на этой оси. Если осей симметрии несколько, то центр масс лежит на их пересечении. При этом центр масс тела может не принадлежать телу как точка (пример - кольцо).
- Если систему разбить на части, для каждой из них найти центр масс, то центр масс системы можно найти по центрам масс частей.

5) Вектор импульса центра масс $\vec{p}_C = \sum_i \vec{p}_i = \sum_i m_i\vec{V}_i$ равен суммарному импульсу точек системы. Поэтому $\vec{p}_C{}'(t) = \sum_i \vec{p}_i'(t) = \sum_i m_i\vec{V}_i{}'(t) = \sum_i m_i\vec{a}_i = m_C\vec{a}_C = \vec{F}^{\,ВНЕШ}$, т.е.

$$\vec{p}_C'(t) = \vec{F}^{\,ВНЕШ}$$

Производная от импульса центра масс системы (*тела*) *равна векторной сумме внешних сил действующих на все точки системы (тела)* в инерциальной системе отсчета.

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА.

Запишем второй закон Ньютона в импульсном виде (для инерциальной системы отсчета):

$$\vec{p}_C'(t) = \vec{F}^{\,ВНЕШ}.$$

Это *векторное* равенство. В трехмерном пространстве - это три уравнения для проекций на оси декартовой системы координат

$$\begin{cases} p_{CX}'(t) = F_X^{ВНЕШ} \\ p_{CY}'(t) = F_Y^{ВНЕШ} \\ p_{CZ}'(t) = F_Z^{ВНЕШ} \end{cases}$$

1. Рассмотрим случай, когда на систему вообще не действуют внешние силы, (такая система называется *замкнутой*) или равнодействующая внешних сил равна нулю $\vec{F}^{\,ВНЕШ} = \vec{0}$.

Это означает, что производная от вектора импульса системы равна нулю $\vec{p}_C'(t) = \vec{0}$.

Поэтому вектор суммарного импульса (замкнутой) системы остается постоянным.

$$\vec{p}_C = m_1\vec{v}_1 + ... + m_N\vec{v}_N = \text{const}.$$

В частности, в проекциях на оси это равенство выглядит так

$$\begin{cases} p_{CX}(t) = m_1 v_{1X} + ... + m_N v_{NX} = \text{const} \\ p_{CY}(t) = m_1 v_{1Y} + ... + m_N v_{NY} = \text{const} \\ p_{CZ}(t) = m_1 v_{1Z} + ... + m_N v_{NZ} = \text{const} \end{cases}$$

Итак, если равнодействующая всех сил, действующих на систему равна нулю, то вектор суммарного импульса системы сохраняется.

2. Рассмотрим такое направление в пространстве, на которое проекция силы $\vec{F}$ равна нулю. Введем систему координат так, чтобы, например, ось X совпадала с этим направлением. Тогда

$$\begin{cases} p'_{CX}(t) = 0 \\ p'_{CY}(t) = F_Y^{ВНЕШ} \\ p'_{CZ}(t) = F_Z^{ВНЕШ} \end{cases}$$

О сохранении *вектора* импульса в этом случае говорить НЕЛЬЗЯ - сохраняется только одна *координата* p_X вектора импульса системы. Но и это порой значительно помогает в решении задачи описания движения тела.

ИЗМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСА.

Запишем второй закон Ньютона в импульсном виде (для инерциальной системы отсчета):

$$\vec{p}'_C(t) = \vec{F}^{ВНЕШ}.$$

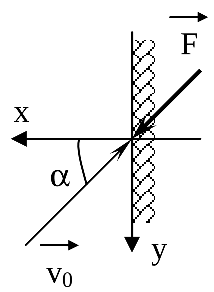
Поэтому вектор изменения импульса системы за интервал времени Δt равен

$$\Delta\vec{p}_C = \int_{t_1}^{t_2} \vec{F}^{ВНЕШ} dt.$$

Выражение в правой части равенства носит название *импульса силы* (*единица измерения Н·с*). Следовательно, *вектор изменения импульса системы за некоторый промежуток времени равен импульсу сил, действующих на тело в течение этого промежутка времени*.

Пример. Пуля массы m ударяется в массивную стену со скоростью v_0 и застревает в ней. Найти среднее значение силы при ударе, если время удара равно Δt.

Решение. Пусть пуля налетает под углом α к нормали к неподвижной стенке. Так как стена массивная, то после удара скорость стены не изменится. Для пули же



можно записать закон изменения импульса

$$\Delta\vec{p} = \int_{t_1}^{t_2} \vec{F} dt,$$

где $\vec{F}$ - вектор силы, действующей на пулю при ударе.

Так мы ищем *среднее* значение силы, то вектор силы можно считать постоянным, поэтому $\Delta\vec{p} = \vec{F}\Delta t$.

Левая часть этого равенства $\Delta\vec{p}(t) = \vec{p}_{КОН} - \vec{p}_{НАЧ} = -\vec{p}_{НАЧ}$, так как $\vec{p}_{КОН} = \vec{0}$. Из этого равенства следует, что вектор силы $\vec{F} = -\frac{\vec{p}_{НАЧ}}{\Delta t} = -\frac{m\vec{v}_0}{\Delta t}$ направлен против вектора скорости при ударе.