

Глава 2

Динамика материальной точки и поступательного движения твёрдого тела

§ 5

Законы Ньютона. Масса. Сила

Первый закон Ньютона: всякое тело находится в состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока воздействие со стороны других тел не заставит его изменить это состояние.

Стремление тел сохранить состояние покоя или равномерного прямолинейного движения называется инертностью.

Системы отсчета, в которых выполняется I закон Ньютона называются инерциальными системами отсчета. Сам закон называют иногда законом инерции.

Системы отсчета в которых I закон Ньютона не выполняется называются неинерциальными.

Свойство тела противиться попыткам изменить его состояние движения называется инертностью. В качестве количественной характеристики инертности используется величина, называемая массой тела.

Релятивистская масса (при $v \leq c$) равна

$$m(v) = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

где m_0 – масса покоя тела.

Единица измерения массы тела $[m] = \text{кг}$.

Произведение массы тела на его скорость называется импульсом (или количеством движения) тела.

$$\vec{p} = m\vec{v}. \quad (5.1)$$

Это определение справедливо для материальной точки и протяженных тел, движущихся поступательно. В случае протяженного тела, движущегося непоступательно, имеем:

$$\vec{p} = \sum_i \Delta m_i \vec{v}_i . \quad (5.2)$$

Второй закон Ньютона: скорость изменения импульса тела равна действующей на тело силе $\vec{F}$:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F} . \quad (5.3)$$

Уравнение (5.3) называется уравнением движения тела.

Подставив выражение (5.1) в уравнении (5.3) получим

$$\frac{d(m\vec{v})}{dt} = \vec{F} .$$

В Ньютонской механике $m = const$

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} \quad (5.4)$$

или

$$m\vec{a} = \vec{F} . \quad (5.5)$$

Произведение массы тела на его ускорение равно действующей на него силе.

Третий закон Ньютона: силы, с которыми действуют друг на друга материальные точки (тела), всегда равны по модулю, противоположно направлены и действуют вдоль прямой, соединяющей эти точки (тела):

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21} . \quad (5.6)$$

Единица измерения силы – $[F] = H$,

импульса $[p] = H \cdot c = \text{кг} \cdot \text{м/с}$.

Пример невыполнения III закона Ньютона.

В качестве нарушения III закона Ньютона может служить система двух заряженных частиц e_1 и e_2 , движущаяся в рассматриваемый момент так, как показано на рис. 10. Кроме

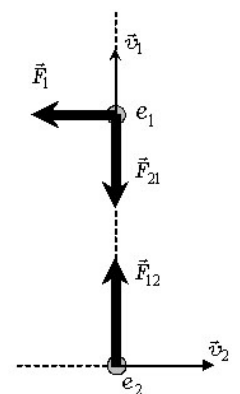


Рис. 10

подчиняющейся третьему закону Ньютона силы электростатического взаимодействия $\vec{F}_{21}$, на первую частицу будет действовать сила Лоренца $\vec{F}_1$. На вторую частицу действует лишь сила $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$. Величина силы Лоренца, действующей на вторую частицу, для изображенного на рисунке случая равна нулю. Отметим, что при скоростях частиц, много меньших скорости света в вакууме (при $v_1 \ll c$ и $v_2 \ll c$), сила $\vec{F}_1$ пренебрежимо мала по сравнению с силой $\vec{F}_{21}$, так что III закон Ньютона оказывается практически справедливым и в этом случае.

Задача 1. Материальная точка массой $m = 2$ кг движется под действием некоторой силы F по закону $x = A + Bt + Ct^2 + Dt^3$, где $C = 1 \text{ м/с}^2$, $D = -0,2 \text{ м/с}^3$. Найдите величину и направление этой силы в моменты времени $t_1 = 1 \text{ с}$ и $t_2 = 5 \text{ с}$. В какой момент сила равна нулю?

Решение. Из второго закона Ньютона проекция силы на ось X равна

$$F_x = ma_x,$$

где a_x – проекция ускорения на ось X равна второй производной координаты по времени

$$a_x = \frac{d^2x}{dt^2} = 2C + 6Dt.$$

Тогда выражение для проекции силы F_x будет иметь вид

$$F_x = m(2C + 6Dt).$$

Подставим числовые значения и найдем проекцию силы в указанные моменты времени

$$F_{x1} = 2 \cdot (2 \cdot 1 + 6 \cdot (-0,2) \cdot 1) = 1,6 \text{ Н},$$

$$F_{x2} = 2 \cdot (2 \cdot 1 + 6 \cdot (-0,2) \cdot 5) = -8 \text{ Н}.$$

Из полученных результатов видно, что вектор силы в первый момент времени направлен вдоль оси X и ее величина равна $F_1 = 1,6 \text{ Н}$. Во второй момент времени вектор силы направлен против оси X и ее величина равна $F_2 = 8 \text{ Н}$.

Теперь найдем момент времени, когда сила равна нулю. Для этого приравняем нулю выражение для проекции силы и выразим время

$$F_x = m(2C + 6Dt) = 0 \text{ или } t = \frac{-2C}{6D} = -\frac{C}{3D}.$$

Подставим числовые значения и найдем этот момент времени

$$t = -\frac{1}{3 \cdot (-0,2)} = 1,7 \text{ с.}$$

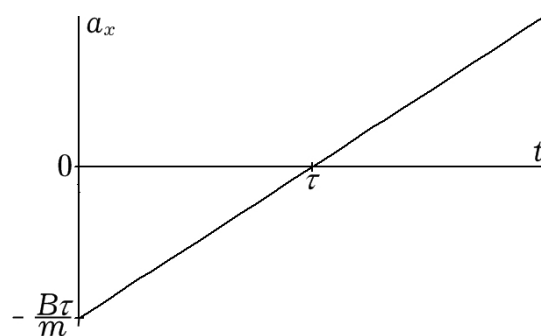
Задача 2. На покоившуюся частицу массой m в момент $t = 0$ начала действовать сила, зависящая от времени по закону $\vec{F} = \vec{i}B(t - \tau)$, где B , τ – положительные постоянные. Определите, как менялись ускорение, скорость и перемещение частицы за время $t < \tau$.

Решение. Из выражения для вектора силы видно, что проекции силы на оси Y и Z равны нулю в любой момент времени. Проекция силы на ось X от времени имеет следующую зависимость

$$F_x = B(t - \tau).$$

Тогда проекция ускорения на ось X зависит от времени следующим образом

$$a_x = \frac{B(t - \tau)}{m}.$$



Из формулы видно, что ускорение направлено против оси X при $t < \tau$. Вектор ускорения равен

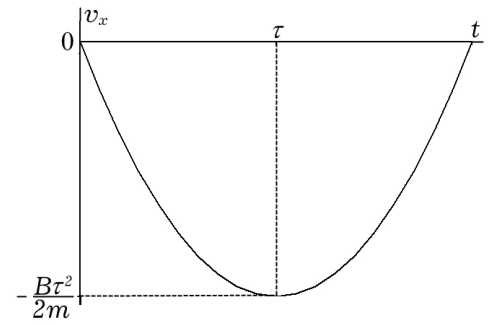
$$\vec{a} = \vec{i} \frac{B}{m} (t - \tau).$$

Проекцию вектора скорости v_x найдем, проинтегрировав по времени проекцию ускорения

$$v_x = \int a_x dt + C = \int \frac{B}{m} (t - \tau) dt + C = \frac{B}{m} \int (t - \tau) dt + C = \frac{B}{m} \left(\frac{t^2}{2} - \tau t \right) + C.$$

Постоянную интегрирования C найдем из условия, что в момент времени $t=0$ тело покоилось, т.е. $v_0=0$. Тогда получаем, что $C=0$ и зависимость проекции скорости от времени будет иметь вид

$$v_x = \frac{B}{m} t \left(\frac{t}{2} - \tau \right).$$



Из формулы видно, что проекция скорости в указанном в условии задачи интервале времени направлена против оси X , а выражение для вектора скорости имеет вид

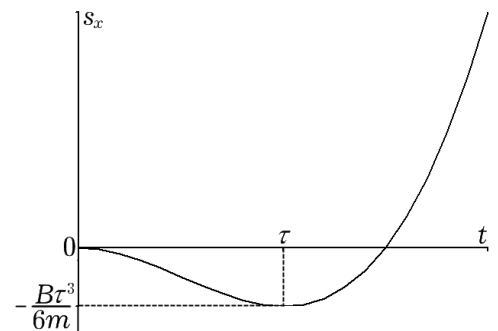
$$\vec{v} = \vec{i} \frac{B}{m} t \left(\frac{t}{2} - \tau \right).$$

Проекцию вектора перемещения s_x найдем из выражения

$$s_x = \int_0^t v_x dt = \int_0^t \frac{B}{m} t \left(\frac{t}{2} - \tau \right) dt = \frac{B}{m} \int_0^t \left(\frac{t^2}{2} - \tau t \right) dt = \frac{B}{m} t^2 \left(\frac{t}{3} - \frac{\tau}{2} \right).$$

Полученное выражение указывает на то, что вектор перемещения в указанном интервале времени всегда направлен против оси X , а формула для вектора перемещения имеет вид

$$\vec{s} = \vec{i} \frac{B}{m} t^2 \left(\frac{t}{3} - \frac{\tau}{2} \right).$$



§ 6

Сила трения

1. Внешнее (сухое трение).
2. Внутреннее (жидкое или вязкое) трение.

Внешним трением называется трение, возникающее в плоскости касания двух соприкасающихся тел при их относительном перемещении.

Трение покоя – трение, возникающее между покоящимися телами.

Трение скольжения, качения или верчения – трение, возникающее между движущимися относительно друг друга поверхностями.

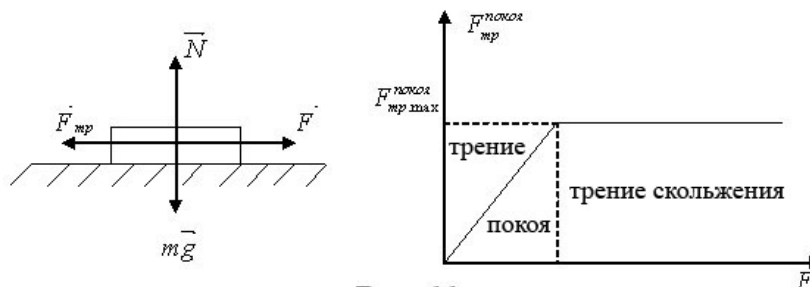


Рис. 11

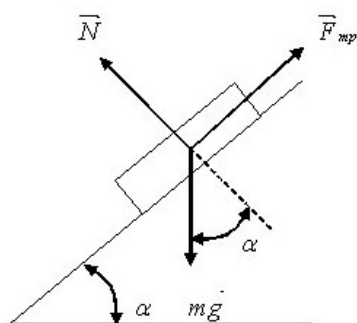


Рис. 12

слоя к слою.

$$F = F_{тр.покоя}, F_{тр.покоя} = F_{тр.скольж} = \mu N.$$

Определим коэффициент трения μ . Если $mg \sin \alpha = \mu N = \mu mg \cos \alpha$, тогда $\mu = \tan \alpha$.

Внутренним трением называется трение между частями одного и того же тела, скорости которых меняются от

Для гладкой поверхности закон трения скольжения можно записать в виде:

$$F_{тр} = \mu_{ист} (N + Sp_0),$$

где p_0 – добавочное давление обусловленное межмолекулярным взаимодействием; S – площадь контакта между телами; $\mu_{ист}$ – истинный коэффициент трения скольжения.

Сила трения качения определяется по закону Кулона:

$$F_{тр} = \frac{\mu_k N}{r},$$

где r – радиус катящегося тела; μ_k – коэффициент трения качения.

$$[\mu_k] = \text{м}$$

1. Применение трения в технике.

2. Как уменьшить силу трения:

а) применение смазок;

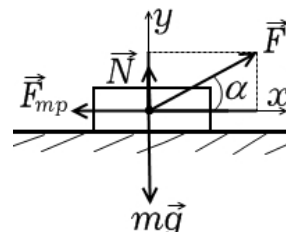
б) замене трения скольжения, трением качения.

Задача 1. На тело массой m , лежащее на горизонтальной плоскости, действует сила F под углом α к горизонту. Коэффициент трения между телом и плоскостью равен μ . Найдите ускорение тела, считая, что оно не отрывается от плоскости.

Решение. Запишем второй закон Ньютона для движущегося тела

$$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{F} + \vec{N} + \vec{F}_{тр},$$

где $m\vec{g}$ – сила тяжести, $\vec{N}$ – сила реакции опоры, $\vec{F}_{тр}$ – сила трения скольжения. В проекции на ось X это равенство будет иметь вид



$$ma = F \cos \alpha - F_{тр}, \quad (1)$$

где величина силы трения скольжения равна $F_{тр} = \mu N$. Теперь запишем уравнение движения в проекции на ось Y

$$0 = -mg + N + F \sin \alpha.$$

Отсюда выразим величину силы N

$$N = mg - F \sin \alpha$$

и подставив ее в равенство (1) получим

$$ma = F \cos \alpha - \mu(mg - F \sin \alpha) = F(\cos \alpha + \mu \sin \alpha) - \mu mg.$$

Тогда ускорение движущегося тела будет равно

$$a = \frac{F}{m}(\cos \alpha + \mu \sin \alpha) - \mu g.$$

§ 7

Закон сохранения импульса. Центр масс

Для вывода закона сохранения импульса введем некоторые понятия.

Совокупность материальных точек (тел), рассматриваемых как единое целое, называется механической системой.

Силы взаимодействия между материальными точками механической системы называются внутренними.

Силы, с которыми на материальные точки системы действуют внешние тела, называются **внешними**.

Механическая система тел, на которую не действуют внешние силы, называется **замкнутой** (или **изолированной**).

Если мы имеем механическую систему, состоящую из многих тел то, согласно III закону Ньютона, силы, действующие между этими телами, будут равны по величине и противоположно направлены, т.е. геометрическая сумма внутренних сил равна нулю.

Рассмотрим механическую систему состоящую из n тел, масса и скорости которых соответственно равны $m_1, m_2, \dots, m_n$ и $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \dots, \vec{v}_n$. Пусть $\vec{F}'_1, \vec{F}'_2, \dots, \vec{F}'_n$ – равнодействующие внутренних сил, действующих на каждое из этих тел, а $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_n$ – равнодействующие внешних сил. Запишем второй закон Ньютона для каждого из n тел механической системы

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}(m_1\vec{v}_1) &= \vec{F}'_1 + \vec{F}_1 \\ \frac{d}{dt}(m_2\vec{v}_2) &= \vec{F}'_2 + \vec{F}_2 \\ &\dots\dots\dots \\ \frac{d}{dt}(m_n\vec{v}_n) &= \vec{F}'_n + \vec{F}_n\end{aligned}$$

Складывая почленно эти уравнения, получим

$$\frac{d}{dt}(m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 + \dots + m_n\vec{v}_n) = \vec{F}'_1 + \vec{F}'_2 + \dots + \vec{F}'_n + \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n.$$

Но так как геометрическая сумма внутренних сил механической системы по третьему закону Ньютона равна нулю, то

$$\frac{d}{dt}(m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 + \dots + m_n\vec{v}_n) = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n$$

или

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n, \tag{7.1}$$

где $\vec{p} = \sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i$ – импульс системы. Таким образом, производная по времени от импульса механической системы равна геометрической сумме внешних сил, действующих на систему.

В случае отсутствия внешних сил (рассматриваем замкнутую систему)

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \sum_{i=1}^n \frac{d}{dt}(m_i \vec{v}_i) = 0,$$

т.е. $\vec{p} = \sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i = \text{const}.$

Это выражение и является **законом сохранения импульса**: импульс замкнутой системы сохраняется, т.е. не изменяется с течением времени.

Закон сохранения импульса справедлив не только в классической физике, хотя он и получен как следствие законов Ньютона. Эксперименты доказывают, что он выполняется и для замкнутой системы микрочастиц (они подчиняются закону квантовой механики). Этот закон носит универсальный характер, т.е. закон сохранения импульса – фундаментальный закон природы.

Закон сохранения импульса является следствием определенного свойства симметрии пространства – его однородности.

Однородность пространства заключается в том, что при параллельном переносе в пространстве замкнутой системы тел как целого ее физические свойства и законы движения не изменяются, иными словами, не зависят от выбора положения начала координат инерциальной системы отсчета.

Определим, что согласно (7.1), импульс сохраняется и для незамкнутой системы, если геометрическая сумма всех внешних сил равна нулю.

В механике Галилея-Ньютона из-за независимости массы от скорости импульс системы может быть выражен через скорость ее центра масс.

Центром масс (или центром инерции) системы материальных точек называется воображаемая точка «С», положение которой характеризует распределение массы этой системы. Ее радиус-вектор равен

$$\vec{r}_C = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \vec{r}_i}{m},$$

где m_i и $\vec{r}_i$ – соответственно масса и радиус-вектор i -ой материальной точки;

n – число материальных точек в системе; $m = \sum_{i=1}^n m_i$ – масса системы.

Скорость центра масс

$$\vec{v}_C = \frac{d\vec{r}_C}{dt} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \frac{d\vec{r}_i}{dt}}{m} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i}{m}.$$

Учитывая, что $\vec{p}_i = m_i \vec{v}_i$, а $\sum_{i=1}^n \vec{p}_i = \vec{p}$, можно написать

$$\vec{p} = m \vec{v}_C, \quad (7.2)$$

т.е. импульс системы равен произведению массы системы на скорость ее центра масс.

Подставив выражение (7.2) в уравнение (7.1), получим

$$m \frac{d\vec{v}_C}{dt} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n, \quad (7.3)$$

т.е. центр масс системы движется как материальная точка, в которой сосредоточена масса всей системы и на которую действует сила, равная геометрической сумме всех внешних сил, действующих на систему.

Выражение (7.3) представляет собой **закон движения центра масс** (или **теорема о движении центра масс**).

В соответствии с (7.2) из закона сохранения импульса вытекает, что центр масс замкнутой системы либо движется прямолинейно и равномерно, либо остается неподвижным.

Задача 1. На материальную точку действует сила, изменяющаяся со временем по закону $\vec{F} = t\vec{i} + 3t^2\vec{j} + 2\vec{k}$ (Н). Найдите импульс точки в момент времени $t = 1$ с, если начальный импульс точки равен $\vec{p}_0 = 2\vec{j} - 0,5\vec{k}$ (Н·с).

Решение. Из второго закона Ньютона

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

выразим изменение импульса точки

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

Для того, чтобы найти изменение импульса точки за промежуток времени от 0 до t проинтегрируем правую часть равенства в указанных пределах, а левую – от начального импульса $\vec{p}_0$ до конечного – $\vec{p}$

$$\int_{\vec{p}_0}^{\vec{p}} d\vec{p} = \int_0^t \vec{F}dt.$$

Подставив вместо $\vec{F}$ соответствующее выражение, и проинтегрировав обе части равенства, получим

$$\vec{p} - \vec{p}_0 = \int_0^t (t\vec{i} + 3t^2\vec{j} + 2\vec{k})dt = \vec{i} \int_0^t tdt + \vec{j} \int_0^t 3t^2dt + \vec{k} \int_0^t 2dt = \frac{t^2}{2}\vec{i} + t^3\vec{j} + 2t\vec{k}.$$

Из этого равенства выразим конечный импульс материальной точки

$$\vec{p} = \frac{t^2}{2}\vec{i} + t^3\vec{j} + 2t\vec{k} + \vec{p}_0 = \frac{t^2}{2}\vec{i} + (t^3 + 2)\vec{j} + (2t - 0,5)\vec{k}.$$

Подставим числовое значение времени и получим вектор конечного импульса

$$\vec{p} = \frac{1^2}{2}\vec{i} + (1^3 + 2)\vec{j} + (2 \cdot 1 - 0,5)\vec{k} = 0,5\vec{i} + 3\vec{j} + 1,5\vec{k}.$$

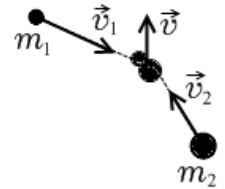
Модуль вектора $\vec{p}$ найдем из равенства

$$p = \sqrt{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2} = \sqrt{0,5^2 + 3^2 + 1,5^2} = 3,4 \text{ Н} \cdot \text{с}.$$

Задача 2. Шар массой $m_1 = 2 \text{ кг}$, летящий со скоростью $\vec{v}_1 = 3\vec{i} + 2\vec{j} - \vec{k}$ (м/с), испытывает абсолютно неупругое соударение с шаром массой $m_2 = 3 \text{ кг}$, имеющим в момент соударения скорость $\vec{v}_2 = -2\vec{i} + 2\vec{j} + 4\vec{k}$ (м/с). Определите вектор скорости $\vec{v}$ шаров и его модуль v после удара.

Решение. Запишем закон сохранения импульса для неупругого соударения

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



Из этого равенства выразим вектор скорости шаров после соударения

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

и, подставив числовые значения, получим

$$\vec{v} = \frac{2 \cdot (3\vec{i} + 2\vec{j} - \vec{k}) + 3 \cdot (-2\vec{i} + 2\vec{j} + 4\vec{k})}{2 + 3} = 2\vec{j} + 2\vec{k}.$$

Модуль скорости шаров после удара найдем по формуле

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} = \sqrt{0^2 + 2^2 + 2^2} \approx 2,8 \text{ м/с}.$$

§ 8

Уравнение движения тела переменной массы

Движение некоторых тел сопровождается изменением их массы, например масса ракеты уменьшается за счет истечения газов, образующихся при сгорании топлива, и т.п.

Выведем уравнение движения тела переменной массы на примере движения ракеты. Если в момент времени t масса ракеты m , а ее скорость $\vec{v}$, то по истечению времени dt , ее масса уменьшится на dm и станет равной $m - dm$, а скорость станет равной $\vec{v} + d\vec{v}$. Изменение импульса системы за отрезок времени dt

$$d\vec{p} = [(m - dm)(\vec{v} + d\vec{v}) + dm(\vec{v} + \vec{u})] - m\vec{v},$$

где $\vec{u}$ – скорость истечения газов относительно ракеты. Тогда

$$d\vec{p} = m d\vec{v} + \vec{u} dm$$

(учли, что $dm \cdot d\vec{v}$ – малый член высшего порядка малости по сравнению с остальными).

Если на систему действуют внешние силы, то $d\vec{p} = \vec{F} \cdot dt$, поэтому

$$\vec{F} dt = m d\vec{v} + \vec{u} dm, \text{ или}$$

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} - \vec{u} \frac{dm}{dt}. \quad (8.1)$$

Член $-\vec{u} \frac{dm}{dt}$ называют **реактивной силой** $\vec{F}_p$. Если $\vec{u}$ противоположен $\vec{v}$, то ракета ускоряется, а если совпадает с $\vec{v}$, то тормозится.

Таким образом, мы получили уравнение движения тела переменной массы

$$m\vec{a} = \vec{F} + \vec{F}_p, \quad (8.2)$$

которое впервые было выведено И.В. Мещерским (1859–1935 гг).

Идея применения реактивной силы для создания летательных аппаратов высказывалась в 1881 г. Н.И. Кибальчичем (1854–1881 гг). К.Э. Циолковский (1857–1935) в 1903 г. опубликовал статью, где предложил теорию движения ракеты и основы теории жидкостного реактивного двигателя. Поэтому его считают основателем отечественной космонавтики.

Применим уравнение (8.1) к движению ракеты, на которую не действуют никакие внешние силы. Полагая $\vec{F} = 0$ и считая, что скорость выбрасываемых газов относительно ракеты постоянна (ракета движется прямолинейно), получим

$$m \frac{dv}{dt} = -u \frac{dm}{dt},$$

откуда

$$v = -u \int \frac{dm}{m} = -u \ln m + C.$$

Значение постоянной интегрирования C определяем из начальных условий. Если в начальный момент времени скорость ракеты равна нулю, а ее стартовая масса m_0 , то $C = u \ln m_0$. Следовательно

$$v = u \ln \frac{m_0}{m}. \quad (8.3)$$

Это соотношение называется **формулой Циолковского**. Оно показывает что:

- 1) чем больше конечная масса ракеты m , тем больше должна быть стартовая масса ракеты m_0 ;

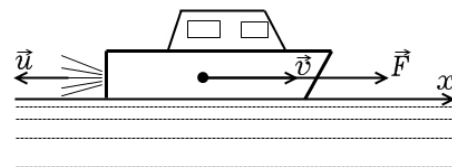
2) чем больше скорость истечения u газов, тем больше может быть конечная масса при данной стартовой массе ракеты.

Выражения (8.2) и (8.3) получены для нерелятивистских движений, т.е. для случаев, когда скорости $v, u \ll c$ (c – скорость света в вакууме).

Задача 1. На катере массой $m = 5$ т находится водомет, выбрасывающий $\mu = 25$ кг/с воды со скоростью $u = 7$ м/с относительно катера назад. Пренебрегая сопротивлением движению катера, определите: 1) скорость катера через 3 мин после начала движения; 2) предельно возможную скорость катера.

Решение. Запишем уравнение движения для катера в векторном виде

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F},$$



где $\vec{F} = -\mu(\vec{u} + \vec{v})$ – реактивная сила, действующая на катер со стороны выбрасываемой воды; $\vec{u} + \vec{v}$ – скорость выбрасываемой воды относительно неподвижной системы отсчета (например, берега). Подставив выражение для силы в уравнение движения, получим

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = -\mu(\vec{u} + \vec{v}).$$

Перейдем от векторной формы уравнения движения к скалярной с учетом направления оси x

$$m \frac{dv}{dt} = -\mu(v - u).$$

Переменными в данном дифференциальном уравнении являются скорость v и время t . Это уравнение будем решать методом разделения переменных

$$\frac{dv}{v - u} = -\frac{\mu}{m} dt.$$

Проинтегрируем обе части этого равенства

$$\int_0^v \frac{dv}{v - u} = -\frac{\mu}{m} \int_0^t dt, \text{ или}$$

$$\ln\left(\frac{v-u}{-u}\right) = -\frac{\mu}{m}t.$$

Выразим из полученного равенства скорость катера

$$v = u \left(1 - e^{-\frac{\mu}{m}t} \right).$$

Подставим числовые значения в СИ и найдем скорость катера в указанный момент времени

$$v = 7 \cdot \left(1 - e^{-\frac{25}{5000}180} \right) = 4,15 \text{ м/с}.$$

Из равенства для скорости видно, что максимальное значение скорости катера достигается при $t \rightarrow \infty$, и это значение будет равно

$$v_{\max} = 7 \text{ м/с}.$$