



**Виртуальный курс физики**

# **МЕХАНИКА**

**Лекция 2. Динамика.**

---

**ТЕОРИЯ, ЗАДАЧИ, ПОДГОТОВКА К ЕГЭ**



**Уважаемые друзья!**

**Вы выбрали Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I и поступили, несомненно, правильно!**

**Наш университет основан в 1809 году. Это старейший инженерный транспортный вуз России. Это "особенный институт" - так в манифесте назвал его Император Александр I.**

**Для того, чтобы успешно пройти вступительные испытания и стать студентом одного из лучших технических вузов России, необходимо иметь высокую подготовку по физике.**

**Как правило, уровень подготовки выпускников школ не всегда соответствует требованиям, предъявляемым к поступающим в высшие учебные заведения. Повысить этот уровень и качественно подготовиться к вступительным испытаниям по физике в технический университет помогут преподаватели факультета довузовской подготовки.**

**Факультет довузовской подготовки организует и проводит курсы по подготовке к поступлению в вуз по программам, соответствующим требованиям ЕГЭ.**

**Занятия проводятся по очной и заочной формам обучения. Занятия по очной форме обучения проводятся в дневное время - с 16.25 (тел. [457-84-04](tel:457-84-04)), и в вечернее время - с 18.00 (тел. [457-87-83](tel:457-87-83)). Мы с удовольствием ответим на все Ваши вопросы.**

**Факультет довузовской подготовки**

***Курс дистанционного обучения по физике  
изложен в авторской редакции доцента  
Петербургского государственного университе-  
та путей сообщения Императора Александра I  
Кытина Юрия Александровича***

# МЕХАНИКА

## Лекция 2.

**Тема: Динамика. Сила, масса, импульс. Законы Ньютона. Гравитационные силы. Силы трения. Силы упругости. Закон Гука.**

### 2.1. Сила, масса, импульс

*Динамикой* называется раздел механики, в котором рассматривается влияние взаимодействий между телами на характер их механического движения. Поэтому при изучении движения тела необходимо рассматривать так же и тела, которые взаимодействуют с ним и влияют на характер его движения. Совокупность тел, рассматриваемых в данной задаче, называется *механической системой тел*.

*Сила* – векторная физическая величина, которая является количественной мерой механического воздействия на тело, других тел или силовых полей. Сила  $\vec{F}$  полностью задана, если заданы её модуль, направление и точка приложения  $O$  (рис. 2.1). Прямая  $n - n$ , вдоль которой направлена сила, называется линией действия силы. Перенос точки приложения силы по линии ее действия не изменяет результат действия этой силы.

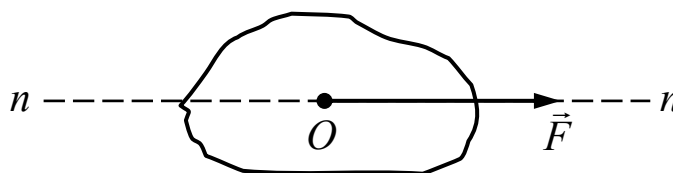


Рис. 2.1

Силы, с которыми тела механической системы взаимодействуют между собой, называются *внутренними силами*. Силы, с которыми тела, не входящие в систему, действуют на тела системы, называются *внешними силами*.

Система тел, на каждое из которых не действуют внешние силы, называется *замкнутой (или изолированной) системой*.

Если на тело действуют несколько сил  $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3, \dots, \vec{F}_n$  одновременно, то их действие может быть заменено действием одной силы  $\vec{F}$ , которая называется *равнодействующей* и равна их геометрической сумме:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_n = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i.$$

Проекции равнодействующей силы на оси прямоугольной системы координат равны алгебраическим суммам соответствующих проекций всех сил:

$$F_X = \sum_{i=1}^n F_{iX}, \quad F_Y = \sum_{i=1}^n F_{iY}, \quad F_Z = \sum_{i=1}^n F_{iZ}.$$

Сила в системе СИ измеряется в ньютонах ( $H$ ).

В отсутствие взаимодействия с другими телами движущееся тело, как показывает опыт, сохраняет свою скорость, а при возникновении таких взаимодействий тело изменяет ее, то есть приобретает ускорение.

Свойство тела сохранять свою скорость в отсутствие взаимодействий и приобретать ускорение при взаимодействии с другими телами называется **инертностью**.

Количественной мерой инертности материальной точки и тела при его поступательном движении является **масса** (или **инертная масса**). Единицей массы в системе СИ служит килограмм ( $кг$ ). Масса является скалярной положительной величиной.

При поступательном движении системы материальных точек или тела их масса может считаться сосредоточенной в одной точке, которая называется **центром масс** или **центром инерции**.

Распределение массы в объеме тела характеризуется **плотностью**. Для однородного тела плотность

$$\rho = \frac{m}{V},$$

где  $m$  – масса тела,  $V$  – его объем. Плотность измеряется в  $кг/м^3$ .

**Импульсом** материальной точки называется произведение массы точки на её скорость:

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

**Импульсом системы**  $n$  материальных точек называется геометрическая сумма импульсов всех точек, входящих в систему:

$$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3 + \dots + \vec{p}_n = \sum_{i=1}^n \vec{p}_i = \sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i$$

**Импульсом тела** называется произведение массы тела на скорость его центра масс:

$$\vec{p} = m\vec{v}_c.$$

Импульс измеряется в килограмм на метр в секунду ( $кг м/с$ ).

## 2.2. Законы Ньютона

**Первый закон Ньютона:** материальная точка сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока внешнее воздействие не изменит этого состояния.

Система отсчета, в которой материальная точка в отсутствии внешних воздействий покоится или движется равномерно и прямолинейно называется **инерциальной системой отсчёта**, а движение точки – **движением по инерции**. Таким образом, первый закон Ньютона устанавливает факт существования инерциальных систем отсчёта.

**Второй закон Ньютона:** ускорение  $\vec{a}$ , приобретаемое материальной точкой в инерциальной системе отсчёта, прямо пропорционально действующей на точку силе  $\vec{F}$ , обратно пропорционально массе  $m$  точки и совпадает по направлению с вектором силы:

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

В проекциях на оси прямоугольной системы координат второй закон Ньютона выражается соотношениями:

$$a_x = \frac{F_x}{m}, \quad a_y = \frac{F_y}{m}, \quad a_z = \frac{F_z}{m}.$$

В другой, более общей формулировке, второй закон Ньютона связывает между собой силу, действующую на тело и изменение импульса тела:

$$\vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t},$$

где  $\Delta \vec{p} = \vec{p} - \vec{p}_0$  – изменение импульса точки или тела за промежуток времени  $\Delta t$ , в течение которого на тело действовала сила.

Произведение силы  $\vec{F}$  на длительность промежутка времени  $\Delta t$  её действия называется **импульсом силы**. С использованием понятия импульса силы  $\vec{F}\Delta t$  второй закон Ньютона может быть сформулирован следующим образом: **импульс силы, действующий на тело в инерциальной системе отсчёта, численно равен изменению импульса точки или тела:**

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

Если на материальную точку или тело действуют несколько сил одновременно, то под силой  $\vec{F}$  во втором законе Ньютона следует понимать равнодействующую этих сил.

При движении материальной точки или тела по окружности ускорением  $\vec{a}$  во втором законе Ньютона является центростремительное ускорение. Равнодействующая всех сил, обеспечивающих это ускорение, направлена к центру окружности и называется **центростремительной силой**.

**Третий закон Ньютона:** две материальные точки в инерциальной системе отсчёта действуют друг на друга с силами, равными по модулю и противоположными по направлению:

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

где  $\vec{F}_{12}$  – сила, действующая на первую точку со стороны второй,  $\vec{F}_{21}$  – сила, действующая со стороны второй точки на первую.

### 2.3. Гравитационные силы

**Закон всемирного тяготения:** две материальные точки притягиваются друг к другу с силами, прямо пропорциональными их массам  $m_1$  и  $m_2$  и обратно пропорциональной квадрату расстояния  $r$  между ними:

$$F_{\text{тяг}} = G \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

где  $G$  – гравитационная постоянная, равная  $6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$ .

**Сила тяжести** – сила, действующая на тело вследствие его притяжения к Земле. Точка, в которой приложена сила тяжести, называется **центром тяжести тела**.

В системе отсчета, связанной с Землей, движение тела с высоты  $h$  над поверхностью Земли, совершаемое телом только под действием силы тяжести  $\vec{F}_{\text{тяг}}$ , происходит с **ускорением свободного падения**  $\vec{g}$ . В соответствии со вторым законом Ньютона

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}_{\text{тяг}}}{m},$$

где  $m$  – масса тела.

Так как векторы  $\vec{F}_{\text{тяг}}$  и  $\vec{g}$  совпадают по направлению, модуль ускорения свободного падения

$$g = \frac{F_{\text{тяг}}}{m},$$

а его зависимость от высоты  $h$  над поверхностью Земли с учетом закона всемирного тяготения выражается следующим образом:

$$g = G \frac{M_3}{(R_3 + h)^2},$$

где  $M_3$  и  $R_3$  – масса и радиус Земли.

**Вес тела** – сила, с которой тело, вследствие притяжения к Земле, действует на горизонтальную опору или вертикальный подвес, удержи-



вающие его от свободного падения. Вес тела приложен к опоре или подвесу. По модулю вес равен силе реакции опоры или силе натяжения подвеса и зависит от характера движения тела относительно Земли:

а) Тело вместе с опорой движется равномерно и прямолинейно по вертикали (рис. 2.2, а). На тело действует сила тяжести  $m\vec{g}$  и реакция опоры  $\vec{N}$ . Так как движение является равномерным, его ускорение  $\vec{a} = 0$  и в соответствии со вторым законом Ньютона

$$\vec{N} + m\vec{g} = 0.$$

В проекциях на ось координат  $OY$ , совпадающую с направлением движения, это уравнение запишется следующим образом:

$$N - mg = 0 \text{ или } N = mg.$$

Вес тела  $P$  приложен к опоре и равен по модулю силе реакции опоры  $N$ , поэтому

$$P = mg$$

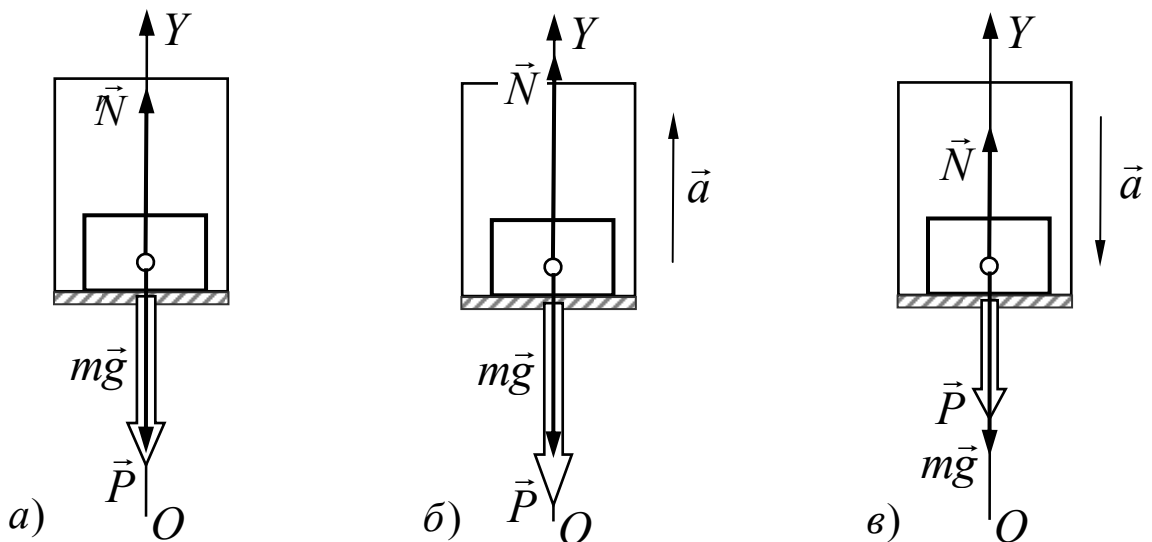


Рис. 2.2

б) Тело вместе с опорой движется по вертикали с ускорением  $\vec{a}$ , направленным вверх (рис. 2.2, б). В этом случае второй закон Ньютона в векторном виде и в проекциях на ось координат, совпадающую по направлению с вектором  $\vec{a}$ , запишется следующим образом:

$$\vec{N} + m\vec{g} = m\vec{a} \text{ или } N - mg = ma, \text{ откуда } N = m(g + a).$$

Отсюда следует, что вес тела будет равен:

$$P = m(g + a).$$

в) Тело вместе с опорой движется по вертикали с ускорением  $\vec{a}$ , направленным вниз (рис. 2.2, в). В этом случае второй закон Ньютона в векторном виде и в проекциях на ось координат, совпадающую по направлению с вектором  $\vec{a}$ , запишется так:

$$\vec{N} + m\vec{g} = m\vec{a}; \quad mg - N = ma \quad \text{или} \quad N = m(g - a).$$

Следовательно, модуль веса тела

$$P = m(g - a).$$

Таким образом, при движении тела по вертикали его вес

а) равен силе тяжести ( $P = mg$ ), если тело движется равномерно;

б) больше силы тяжести ( $P > mg$ ), если тело движется с ускорением  $\vec{a}$ , направленным вверх, тело при этом испытывает **перегрузку**;

в) меньше силы тяжести ( $P < mg$ ), если тело движется с ускорением  $\vec{a}$ , направленным вниз. В этом случае, если  $a=g$ , то  $P=0$ , и имеет место **состояние невесомости**, при котором на тело действует только сила тяжести.

Если телу, находящемуся на высоте  $h$  над поверхностью Земли сообщить начальную скорость  $\vec{v}$  в горизонтальном направлении, то оно вследствие того, что Земля имеет сферическую форму, одновременно с продвижением в направлении вектора скорости будет под действием силы тяжести приближаться к поверхности Земли (рис. 2.3).

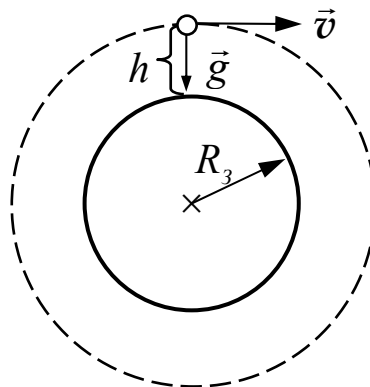


Рис. 2.3

При определенном значении скорости  $\vec{v}$  поверхность Земли, из-за ее кривизны, будет удаляться от тела как раз на столько, на сколько тело приближается к Земле благодаря притяжению к ней и тело будет двигаться на постоянном расстоянии  $h$  от поверхности Земли, т.е. по окружности радиусом  $(R_3 + h)$ , с центростремительным ускорением,

$$a_n = \frac{v^2}{(R_3 + h)},$$

которое сообщает телу массой  $m$  гравитационная сила

$$F_{\text{тяг}} = G \frac{mM_3}{(R_3 + h)^2}.$$

По второму закону Ньютона

$$F_{\text{тяг}} = ma_n$$

или

$$G \frac{mM_3}{(R_3 + h)^2} = m \frac{v^2}{(R_3 + h)},$$

откуда следует, что

$$v = \sqrt{G \frac{M_3}{(R_3 + h)}}.$$

**Первая космическая скорость** – это скорость, которую нужно сообщить телу, чтобы оно обращалось вокруг Земли как искусственный спутник.

Первая космическая скорость для спутника, движущегося по орбите на высоте  $h \ll R_3$ , будет равна:

$$v = \sqrt{G \frac{M_3}{R_3}} = \sqrt{gR_3}.$$

С использованием численных значений величин  $g$  и  $R_3$  значение первой космической скорости получается равным  $v \approx 8 \cdot 10^3 \text{ м/с}$ .

## 2.4. Силы трения

**Трением (внешним трением)** называется взаимодействие между поверхностями соприкасающихся тел, которое препятствует их перемещению друг относительно друга.

Трение, при котором между поверхностями соприкасающихся тел отсутствует жидкая или газовая прослойка, называется **сухим трением**.

Трение, возникающее при отсутствии относительного перемещения соприкасающихся тел, называется **трением покоя**.

Сила  $\vec{F}_{\text{тр}0}$ , препятствующая возникновению относительного перемещения тел вдоль соприкасающихся поверхностей, называется **силой трения покоя**.

Сила трения покоя растет с ростом внешней силы  $\vec{F}_{\text{внеш}}$ , приложенной к одному из тел, от нуля до некоторого максимального значения  $F_{\text{тр}0}^{\text{max}}$ , после достижения которого начинается относительное перемещение тел.

Максимальная сила трения покоя  $F_{\text{тр}0}^{\text{max}}$  прямо пропорциональна силе нормального давления:

$$F_{\text{тр}0}^{\text{max}} = \mu_0 P_{\text{д}},$$

где  $P_{\text{д}}$  — модуль силы нормального давления, действующей со стороны тела на опору (рис. 2.4) и равной по модулю силе  $N$  реакции опоры;

$\mu_0$  — **коэффициент трения покоя**, зависящий от материала соприкасающихся тел, степени обработки их поверхностей и внешних условий.

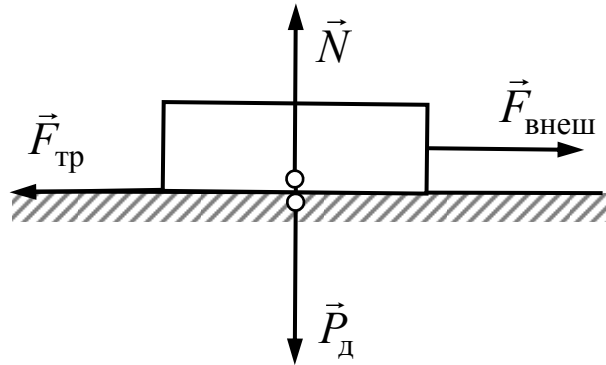


Рис. 2.4

Трение, возникающее при относительном смещении соприкасающихся тел, называется **трением скольжения**, а сила  $\vec{F}_{\text{тр}}$ , возникающая при этом и препятствующая относительному перемещению тел, называется **силой трения скольжения**. Сила трения скольжения прямо пропорциональна силе нормального давления, а так как  $P_{\text{д}} = N$ , то

$$F_{\text{тр}} = \mu N,$$

где  $\mu$  — коэффициент трения скольжения, зависящий от тех же факторов, что и коэффициент трения покоя, а также от относительной скорости движения соприкасающихся тел. Опыт показывает, что  $\mu_0 > \mu$ .

## 2.5. Силы упругости. Закон Гука

Под воздействием внешних сил тела могут изменять свою форму и размеры. Такие изменения называются **деформациями**. При деформациях частицы тела смещаются из положений равновесия. Этому смещению препятствуют силы, с которыми частицы взаимодействуют между собой, то есть в теле возникают внутренние силы, препятствующие деформации. Эти силы называются **силами упругости**.

Деформации, которые исчезают после того, как действие внешних сил прекращается, называются **упругими деформациями**.

Деформации, которые не исчезают или исчезают частично после прекращения действия внешних сил, называются **неупругими или пластичными**.

Количественно деформации оцениваются абсолютными и относительными значениями. Так, линейные одномерные деформации (растяжение и сжатие), характеризуются **вектором удлинения (сжатия)  $\Delta \vec{l}$**  (рис.2.5), модуль которого  $\Delta l = l - l_0$  называется **абсолютным удлинением (сжатием)**.

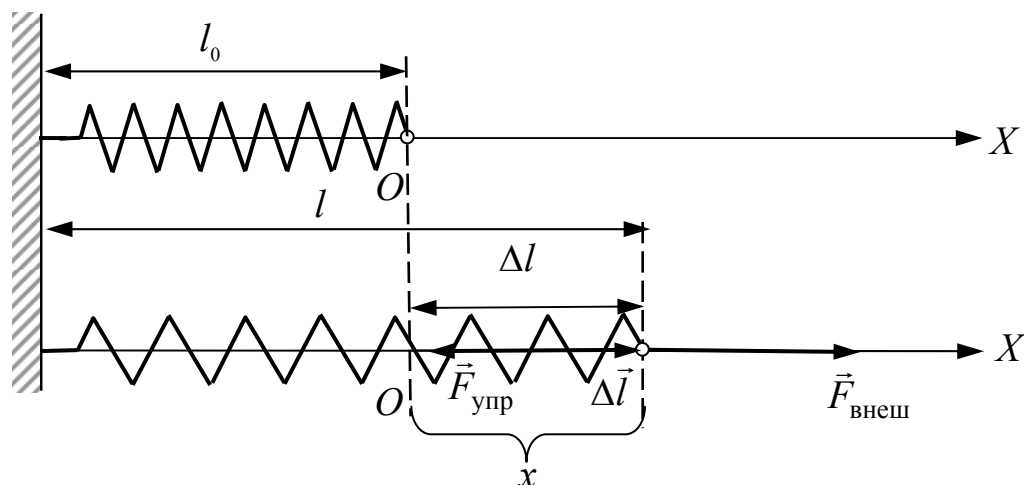


Рис. 2.5

Отношение абсолютного удлинения (сжатия)  $\Delta l$  к первоначальной длине  $l_0$  называется **относительной деформацией**:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}.$$

Отношение силы упругости  $F_{\text{упр}}$  к площади поперечного сечения  $S$  деформируемого тела, перпендикулярного направлению силы, называется **нормальным напряжением**:

$$\sigma_n = \frac{F_{\text{упр}}}{S}.$$

Силы упругости, возникающие при упругих линейных деформациях, подчиняются опытному **закону Гука**: *сила упругости пропорциональна вектору удлинения и противоположна ему по направлению*:

$$\vec{F}_{\text{упр}} = -k\Delta \vec{l},$$

где  $k$  – **коэффициент упругости**, значение которого зависит от материала, линейных размеров и формы деформируемого тела.

В проекциях на ось координат, совпадающей с осью деформируемого тела и направлением внешней силы, закон Гука записывается следующим образом:

$$F_{\text{упр}X} = -kx.$$

В другой формулировке закон Гука связывает между собой нормальное напряжение  $\sigma_n$ , возникающее при упругом удлинении (сжатии), и относительную деформацию  $\varepsilon$ :

$$\sigma_n = E\varepsilon,$$

где  $E$  – **модуль Юнга**, значение которого зависит от материала деформируемого тела.

Сила упругости, действующая на тело со стороны опоры или подвеса, называется **силой реакции опоры**  $\vec{N}$  или **силой натяжения подвеса**  $\vec{T}$ .

На рис. 2.6 приведены примеры приложения сил реакций опоры и сил натяжения подвесов.

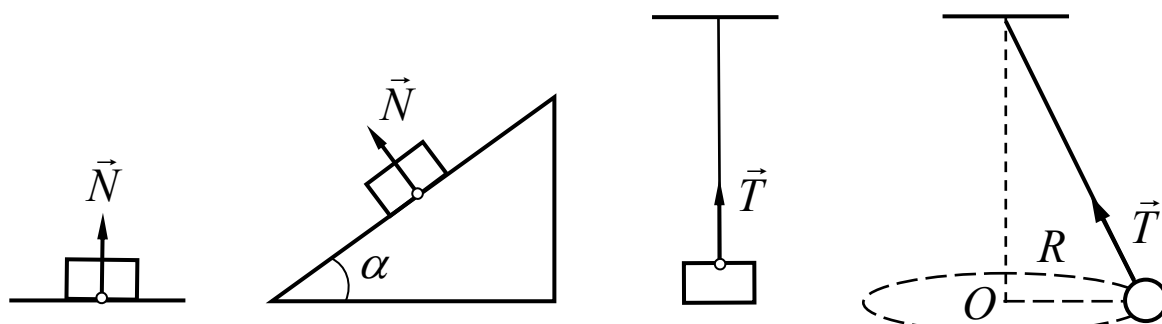


Рис. 2.6

## **От авторов**

***Возникли трудности в усвоении теоретического курса или в его применении при решении конкретных задач, тестов – записывайтесь на наши курсы и мы поможем Вам подойти к экзамену во всеоружии.***

***Наш адрес:***

***190031, г. Санкт-Петербург, Московский проспект, дом 9, ПГУПС, факультет довузовской подготовки.***

***Наши телефоны отдела заочной формы обучения:***

***8 (931) 214-51-45;***

***8 (812) 457-88-07 .***