

# МЕХАНИКА И ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

---

*профессор Валерий Иванович Тельнов*

## **Введение**

Физика – главная наука о природе, изучающая наиболее общие, фундаментальные законы природы. Механика классическая и квантовая, нерелятивистская и релятивистская, границы применимости. Пространство и время. Кинематика и динамика. Масштабы времён и расстояний в природе.

## **Нерелятивистская кинематика**

1. Координаты, скорость, ускорение.
2. Движение по окружности, нормальная и тангенциальная составляющие ускорения. Общий случай криволинейного движения. Радиус кривизны.
3. Инерциальные системы отсчета. Принцип относительности. Преобразования Галилея.

## **Релятивистская кинематика**

4. Максимальная скорость распространения сигнала. Опыт Майкельсона и Морли. Постулаты Эйнштейна. Синхронизация часов, относительность одновременности. Инвариантность поперечного размера. Замедление хода движущихся часов. Время жизни движущихся частиц, сокращение продольного размера движущегося предмета. «Парадокс» близнецов.
5. Преобразования Лоренца. Релятивистские преобразования скорости.
6. Абerrация. Эффект Доплера.
7. Интервал и собственное время. Типы интервалов и характер связи между событиями. Пространство Минковского. 4-векторы. 4-скорость.

### **Нерелятивистская динамика. Силы в природе.**

8. Законы динамики Ньютона. Определение силы. Второй закон Ньютона. Масса. Третий закон Ньютона. Суперпозиция сил. Уравнения Ньютона и принцип относительности.
9. Импульс. Закон сохранения импульса у замкнутой системы тел. Сила как мера скорости изменения импульса. Аддитивность масс. Центр инерции. Задача двух тел.
10. Реактивное движение, формула Циолковского.
11. Работа. Кинетическая энергия. Связь работы силы с изменением кинетической энергии.
12. Консервативные (потенциальные) и неконсервативные силы. Потенциальная энергия.
13. Закон сохранения механической энергии.
14. Связь законов сохранения импульса и энергии с однородностью пространства и времени.
15. Распады и соударения в нерелятивистской механике.
16. Поле. Электрическое взаимодействие, закон Кулона. Гравитационное взаимодействие, закон всемирного тяготения. Фундаментальные взаимодействия: сильное, электромагнитное, слабое, гравитационное.

### **Релятивистская динамика**

17. Релятивистский импульс и энергия.
18. 4-вектор энергии-импульса, преобразования Лоренца для энергии и импульса.
19. Работа силы и изменение энергии. Эффект Доплера и абберация как следствие преобразований Лоренца для энергии-импульса.
20. Релятивистская сила как производная релятивистского импульса по времени. Связь работы силы с изменением энергии.

21. Упругие столкновения и распады и в релятивистской механике. Комптоновское рассеяние. Распад пиона на два фотона. Пороги реакций. Метод встречных пучков.
22. Энергия связи. Реакции деления и синтеза атомных ядер.
23. Сила Лоренца (без вывода). Движение в постоянном магнитном поле. Магнитное поле как проявление релятивистского эффекта в кулоновском взаимодействии.

### **Колебания, волны**

24. Одномерное движение в потенциальном поле. Фазовая плоскость. Период колебания.
25. Гармонические колебания.
26. Затухающие колебания. Добротность.
27. Вынужденные колебания. Резонанс.
28. Параметрический резонанс (на примере качелей).
29. Волны в упругой среде, уравнение плоской волны. Скорость поперечных волн в натянутой струне. Скорость продольных волн в упругой среде. Стоячие волны.

### **Центральное поле**

30. Момент силы, момент импульса относительно неподвижной оси. Сохранение момента импульса для замкнутой системы тел и для движения частицы в центральном поле. Связь закона сохранения момента импульса с изотропией пространства.
31. Движение в центральном поле. Эффективный потенциал. Фinitные и инфинитные траектории. Условия падения на центр.
32. Движение в кулоновском поле. Законы Кеплера. Космические скорости.
33. Рассеяние частиц. Сечение рассеяния твердых шариков. Опыт Резерфорда. Эффективное сечение Резерфордского рассеяние быстрых частиц под малыми углами.

### **Движение твердого тела**

34. Поступательное и вращательное движение твердого тела. Мгновенная ось вращения. Разложение движения на поступательное и вращательное.
35. Кинетическая энергия твердого тела. Момент инерции. Теорема Гюйгенса-Штейнера.
36. Момент импульса твердого тела. Уравнение движения твердого тела. Движение тела с закрепленной осью. Качение тел.
37. Гироскоп. Прецессия гироскопа под действием сил.
38. Равновесие твердого тела, элементы статики.

### **Элементы гидродинамики идеальной жидкости.**

39. Гидростатика. Стационарное течение. Закон Бернулли. Формула Торричелли. Гидравлический удар. Кумулятивный снаряд.

### **Неинерциальные системы отсчета**

40. Силы инерции при ускоренном поступательном движении системы отсчета. Силы инерции во вращающейся системе отсчета, центробежная и кориолисова силы, влияние на движение тел на Земле. Приливы.

### **Элементы общей теории относительности**

41. Понятие об общей теории относительности, искривление пространства. Принцип эквивалентности гравитационных сил и сил инерции. Инертная и гравитационная массы. Опыт Этвеша. Падение фотона в гравитационном поле. Замедление времени в гравитационном поле.

### **Элементы квантовой механики**

42. Волновые свойства частиц, соотношение неопределенности Гейзенберга. Размер атома.

### **Современное представление о вселенной**

43. Физика элементарных частиц. Современное представление о Вселенной. Расширяющаяся Вселенная, критическая плотность. Темная материя и темная энергия.

## **Литература**

1. **Тельнов В.И.** Механика и теория относительности, НГУ, 2015 (есть на сайте данного курса).
2. **Матвеев А. Н.** Механика и теория относительности. М.: Высшая школа. 1986.
3. **Сивухин Д.В.** Общий курс физики, т.1, Механика. М.: Наука. 1989.
4. **Киттель Ч., Найт У., Рудерман М.** Механика (Берклевский курс физики), М.: Наука, 1975.
5. **Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс И.** Фейнмановские лекции по физике. Т.1-2. М.: Мир. 1977.
6. **Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.** Механика. М.: Наука. 1988.

### **Программа семинаров**

Темы семинарских занятий и номера задач, рекомендуемых для рассмотрения на семинарских занятиях и для домашних заданий. Нумерация по задачнику Ахметов Т.Д., Болеста А.В., Еманов Ф.А., Руденко А.С., Тельнов В.И., Шошин А.А. (под ред. Тельнова В.И.), «Задачи по механике и теории относительности». Учеб. пособие. Новосибирский гос. ун-т. Новосибирск, 2016. – 168 с (на сайте курса)

<b>№ семинара</b>	<b>Тема семинара</b>	<b>№ задач</b>
1-4	Нерелятивистская кинематика	1.1-1.40
5-8	Релятивистская кинематика	2.1-2.31
9-12	Нерелятивистская динамика	3.1-3.50
13-17	Релятивистская динамика.	4.1-4.57
18-21	Одномерное движение, колебания и волны	5.1-5.34

22-25	Центральное поле, рассеяние	6.1-6.36
26-30	Движение твердого тела, жидкости	7.1-7.40
31-32	Неинерциальные системы отсчета	8.1-8.15
33-34	Решение задач по всему пройденному материалу	

В течение семестра будет две потоковые письменные контрольные работы, а также третья экзаменационная письменная работа по всем темам во время сессии перед итоговым устным экзаменом. Оценки за эти работы будут учитываться при выставлении итоговой оценки на устном экзамене. Также вам будет необходимо решить и сдать преподавателю три “месячных” заданий, примерно по 10 задач (см. ниже). Активная работа на семинарах, решение домашних задач и своевременная сдача месячных заданий необходимы для получения допуска к экзамену, рекомендательная оценка преподавателя также будет учитываться при выставлении итоговой оценки.

## «Месячные» задания

### Задание 1: Нерелятивистская и релятивистская кинематика

(сдать до 15 октября или раньше).

1. Скорость автомобиля от времени задается следующим выражением:

$$V = \begin{cases} V \left( 1 - \cos \frac{\pi t}{\tau} \right), & \text{при } 0 < t \leq \tau \\ 2V, & \text{при } \tau < t \leq \tau_1 . \\ 2V \frac{\tau_2 - t}{\tau_2 - \tau_1}, & \text{при } \tau_1 < t \leq \tau_2 \end{cases}$$

Найти зависимость ускорения и пройденного пути от времени. Нарисовать синхронные графики ускорения, скорости и пройденного пути.

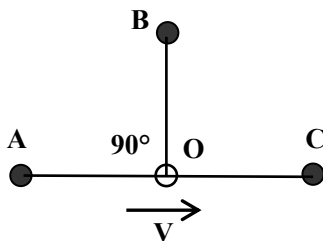
2. Лодку подтягивают к берегу с помощью веревки, стоя на высоком берегу. Веревку выбирают со скоростью  $v = 1$  м/с. С какой скоростью движется лодка, когда угол между веревкой и горизонтом составляет  $\alpha = 60^\circ$ .

3. Дельфин для обнаружения рыбы излучает звуковой сигнал в течение времени  $\tau_0$ . Какой длительности отраженный сигнал он услышит, если скорость звука в воде  $c$ . Дельфин и рыба двигаются в одном направлении со скоростями  $v_1$  и  $v_2$ , соответственно.

4. На какую максимальную высоту  $h$  относительно поверхности земли поднимаются капли воды, срывающиеся с обода мокрого велосипедного колеса радиуса  $R$  при скорости велосипеда  $v$ ?

5. Один из двух стержней покоится, а другой движется вдоль него со скоростью  $V$ . В какой системе отсчета длины стержней будут одинаковыми?

6. В точках  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , находящихся на расстоянии  $R$  от центра  $O$  лабораторной системы отсчета одновременно происходят вспышки света. Через какое время (по своим часам) увидит вспышки наблюдатель,двигающийся со скоростью  $V = 0.8c$  вдоль линии  $AC$ ? В



момент вспышек наблюдатель находился в точке  $O$ .

7. Два космических корабля, связанных эластичным тросом длины  $L$ , в системе отсчета Земли одновременно начинают движение с постоянным ускорением  $g$  и после некоторого времени одновременно выключают двигатели и продолжают движение с постоянной скоростью  $V$ . Найти максимальное значение  $V$ , для которого корабли останутся связанными, если трос выдерживает двукратное растяжение.

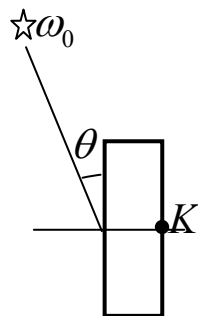
8. Прямоугольный стеклянный брусок длины  $L$  движется со скоростью  $V$  параллельно своей грани. Одна из сторон бруска, перпендикулярная к скорости, посеребрена. Сколько времени по часам неподвижных наблюдателей потребуется свету, летящему навстречу бруску, чтобы пройти сквозь брусок, отразиться от посеребренной грани и выйти из бруска? Какое время пройдет в лабораторной системе отсчета между входом света в брусок и его отра-



жением от зеркальной грани? Скорость света в неподвижном бруске  $u$ .

9. Пенал длины  $L_{II}$ , открытый с одной стороны, налетает на карандаш длины  $L_K$ . За счет релятивистского сокращения длины пенал оказывается короче покоящегося карандаша, т.е. карандаш не может уместиться в пенале. В системе пенала все выглядит наоборот: летящий карандаш короче пенала и может уместиться в нем. Так, все-таки, помещается карандаш в пенал или нет? При каком соотношении длин пенала и карандаша наблюдатель, сидящий у открытого конца пенала, сможет спокойно закрыть крышку после того как мимо него пролетит конец карандаша? («Спокойно» означает, что пенал к этому времени не разлетится вдребезги от удара карандаша о дно пенала. Считать, что сигнал распространяется по пеналу со скоростью света).

10. Космонавт, сидящий у иллюминатора на правой стороне покоящегося корабля (точка  $K$ ), не может видеть звезду, расположенную в противоположной полусфере под углом  $\theta$  относительно стенки корабля и излучающую на средней частоте  $\omega_0$ . Куда должен двигаться корабль (налево или направо) и с какой минимальной скоростью, чтобы космонавт смог увидеть эту звезду? Какая будет при этом видимая частота излучения звезды?



11. Звезда, находящаяся на расстоянии  $R$  от Земли сбрасывает оболочку, которая разлетается со скоростью  $V$  относительно звезды. Найти скорость увеличения видимого углового размера звезды  $d\theta/dt$ . Какая будет при этом

видимая скорость разлета, если ее посчитать как  $u = R \frac{d\theta}{dt}$ ?

Астрономы наблюдали подобное явление и нашли, что видимая скорость разлета больше скорости света, но быстро поняли, в чем дело. Попробуйте разобраться с этой задачей и вы.

## Задание 2:

### Нерелятивистская и релятивистская механика

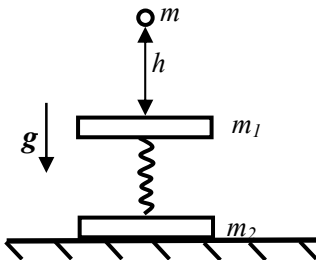
(сдать до 15 ноября или раньше).

1. Под каким углом  $\alpha$  к склону горы (угол наклона горы  $\beta$ , высота  $h$ ) нужно тянуть веревку, чтобы тащить санки в гору с наименьшим усилием? Под каким углом  $\alpha$  нужно тянуть, чтобы работа по затаскиванию санок на горку была минимальна? Чему равна эта работа? Коэффициент трения равен  $k$ . Считать, что сила приложена к центру тяжести санок.

2. Ракета с начальной массой  $m_0$  поднимается вертикально вверх в однородном поле тяжести Земли (ускорение  $g$ ). Скорость газовой струи относительно ракеты равна  $u$ . Расход массы за единицу времени  $\mu = -dm/dt$  постоянен. Найти зависимость скорости ракеты от времени.

3. Шайба скатывается с вершины полусферического купола с начальной горизонтальной скоростью  $V_0$ . В какой точке купола шайба оторвется? Радиус купола  $R$ , ускорение свободного падения  $g$ .

4. Две пластинки с массами  $m_1$  и  $m_2$  скреплены пружинкой с коэффициентом жесткости  $k$ . На верхнюю пластинку с высоты  $h$  падает пластилиновый шарик



массы  $m$ . Найдите минимальную высоту, при которой нижняя пластина оторвется от стола.

5. Релятивистская частица с массой  $m$  и энергией  $E$  пролетает насквозь плоский конденсатор с разностью потенциалов  $U$ . Угол падения (относительно нормали)  $\alpha$ , найти угол  $\beta$  на выходе.

6. Протоны, летящие через вселенную, могут сталкиваться с реликтовыми фотонами, имеющими энергию  $E_\gamma = 3 \cdot 10^{-4}$  эВ. Найти величину пороговой энергии протона для реакции  $p + \gamma \rightarrow \Delta^+$ , если масса  $\Delta^+$  резонанса равна  $M_\Delta = 1232$  МэВ, масса протона  $M_p = 938$  МэВ. (Именно за счет этого процесса поток космических лучей, долетающих до Земли, резко падает при энергии выше пороговой).

7. Под действием лазерного луча мощности  $N = 10$  МВт зеркало удерживается в поле тяжести. На сколько нужно увеличить мощность, чтобы это зеркало двигалось вверх с постоянной скоростью  $V = 100$  м/с.

8. Какой минимальный радиус должен иметь электрон-позитронный ускоритель со встречными пучками, чтобы на нем можно было наблюдать рождение  $Z$ -бозона с массой 90 ГэВ? Магнитное поле на дорожке ускорителя 1 Т. Какая должна быть энергия и радиус ускорителя для рождения  $Z$ -бозонов при столкновении позитронного пучка с мишенью из неподвижных электронов? Масса электрона и позитрона  $m_e = 0.511$  МэВ.

9. Нейтрино получают в распаде  $\pi \rightarrow \mu\nu$ . Найти энергетический спектр нейтрино в лабораторной системе от-

счета, если энергия пионов  $E_0$ . Массы пионов и мюонов  $m_\pi$  и  $m_\mu$ , массу нейтрино считать нулевой. (Примечание: похожая задача, распад  $\pi_0 \rightarrow \gamma\gamma$ , была рассмотрена на лекции.)

### Задание 3

(сдать до 22 декабря или раньше).



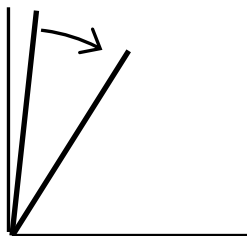
1. Бусинка надета на невесомую гладкую нить длиной  $L$ , концы которой закреплены на одинаковой высоте на расстоянии  $d$  друг от друга. Найти частоту малых колебаний бусинки вдоль нити.

2. Частица движется без трения по поверхности чашки, описываемой в цилиндрической системе координат уравнением  $z = \alpha r^4$ . Поле тяжести направлено вдоль оси  $z$ . На высоте  $h$  скорость частицы была горизонтальной и равна  $V$ . Найти границы движения частицы.

3. Найти время падения массы  $m$  в центр поля  $U = -\alpha / r^6$  с расстояния  $R$ , если ее полная энергия равна нулю, а начальная скорость перпендикулярна направлению на центр. Нарисовать эффективный потенциал и фазовую траекторию для радиального движения частицы.

4. Две звезды с массами  $M_1$  и  $M_2$  движутся по окружностям вокруг общего центра масс. У звезды массы  $M_1$  в результате сферически-симметричного взрыва сбрасывается внешняя оболочка массы  $qM_1$ , которая, расширяясь, быстро уходит за пределы двойной системы. При каком значении  $q$  двойная система перестанет быть связанной гравитационными силами?

5. Найти моменты инерции однородной тонкостенной сферы, однородного кольца и однородного цилиндра.



6. Тонкая однородная палка стоит на гладком полу, прислоненная к гладкой стене, а затем начинает падать с нулевой начальной скоростью, упираясь в угол. Какой угол будет между палкой и стеной, когда нижний конец отделится от стены?

7. Тонкая пластинка, имеющая форму равностороннего треугольника, совершает колебания в поле тяжести вокруг горизонтальной оси, совпадающей с одной из ее сторон. Чему равен период малых колебаний?

8. Вертикальная U-образная трубка, заполненная водой, вращается вокруг одной из своих половин с угловой скоростью  $\omega$ . Расстояние между прямолинейными частями трубки  $L$ . Концы трубки открыты. Найти разность уровней воды в трубке.

