



$$E = mc^2$$

В.М.Поезжалов

# Ф И З И К А



# Т Е Х Н И К Е



Костанай 2020



Министерство образования и науки Республики Казахстан  
Костанайский региональный университет имени А. Байтурсынова

Кафедра физики

**В. М. ПОЕЗЖАЛОВ**

***ФИЗИКА***  
***В***  
***ТЕХНИКЕ***

Учебное пособие по элективной дисциплине  
с применением интерактивной технологии  
и сети « Интернет»

**КОСТАНАЙ - 2021**

**УДК 53 (075.8)**  
**ББК 22.3м73**  
**П45**

Автор и составитель:

Поезжалов Владимир Михайлович, кандидат физико-математических наук,  
профессор

Рецензенты:

Джаманбалин Кадыргали Коныспаевич – доктор физико-математических наук, профессор.

Кушнир Валентина Геннадьевна – доктор технических наук, профессор.

Калаков Берген Абитович – кандидат физико-математических наук, доцент.

**П 45** Поезжалов В.М.

Физика в технике: Учебное пособие по элективной дисциплине с интернет-иллюстрациями/ В.М. Поезжалов. – Костанай: КГУ имени А.Байтурсынова, 2021. - 200 с.

**ISBN 978-601-356-021-2**

В книге доступно рассказывается о проявлении физических законов в различных аспектах жизни людей и сделан акцент на взаимодействии физики и техники. Изложение построено таким образом, что вначале показаны сами физические закономерности, а затем приведены примеры их проявления в технике, быту и жизни. Книга хорошо иллюстрирована, а кроме того в каждой теме имеются гиперссылки, позволяющие рассмотреть в динамике работу различных физических законов в конкретных механизмах.

Книга поможет студентам физических специальностей, учителям школ и колледжей в изучении дополнительного материала по физике, в частности при технологии дистанционного образования, и будет интересна широкому кругу читателей интересующихся физикой и техникой

**ISBN 978-601-356-021-2**

**УДК 53 (075.8)**  
**ББК 22.3м73**

© Поезжалов В.М. 2021

## ВВЕДЕНИЕ

Поскольку наука и инжиниринг всегда опережают развитие производства и внедрение научных новшеств в жизнь, то существует разрыв между современной наукой и той техникой, которая окружает нас в повседневной жизни и на производстве. Задачи, которые предлагаются студентам в курсе физики, по-видимому, слабо связаны с современными открытиями и достижениями. В то же время уровень преподавания физики в университетах достаточно высок, чтобы оценить и даже иногда рассчитать некоторые важные свойства явлений, имеющих отношение к передовой науке.

Физика изучает наиболее простую и вместе с тем наиболее общую форму движения материи: механические, атомно-молекулярные, гравитационные, электромагнитные, внутриатомные и внутриядерные процессы. Таким образом, можно сказать, что предмет исследования физики составляют общие закономерности явлений природы. Физика позволяет создавать приборы и вырабатывать методы исследования, необходимые для успешного развития всех естественных и прикладных наук. Трудно переоценить значение, которое имели, например, микроскоп в развитии биологии, телескоп в астрономии, спектральный анализ в химии, рентгеновский анализ в медицине и т.д. Все естественные и прикладные науки широко и плодотворно применяют теперь метод меченых атомов, электронную аппаратуру и другие физические приборы и методы исследования. Можно, поэтому утверждать, что физика является фундаментом, на котором строятся все естественные и прикладные науки. Стоит отметить, что связь физики с другими науками взаимна: развиваясь с помощью физики, эти науки обогащают физику своими достижениями и ставят перед нею новые задачи, разрешая которые физика развивается и совершенствуется сама.

Главная идея этого курса — способствовать согласованию между современной техникой и той физикой, что преподают студентам. Мы надеемся, что такое взаимодействие возбудит интерес, как к изучению физики, так и к современным научным разработкам. Наилучшим результатом можно было бы считать то, что изучение курса «Прикладная физика, Физика в технике» и подобных поможет студентам лучше понять научные идеи, лежащие в основе и принципе работы технических устройств, и хорошо разобраться в них, чтобы впоследствии применить полученные знания в учебе и на работе.

Весь курс построен таким образом: в начале каждой лекции дается краткий обзор физических законов, правил и зависимостей, а затем показана реализация этих законов в различных областях жизни, быта и современной науки и техники. По каждой теме мы попытались

дать основные сведения, а также рассказать о последних достижениях в данной области. Мы не ставили перед собой цели довести доступность представляемого материала до уровня научно-популярной литературы, и здесь, несомненно, присутствует некоторый уклон в сторону физики. Предлагаемые задачи связаны с последними достижениями в современной науке. Некоторые из задач имеют эвристическое направление, что, по нашему мнению, должно способствовать развитию у студентов инженерного мышления и нетрадиционного решения.

Вместе с тем мы решили ограничиться изложением только ключевых тем, отражающих вопросы, изучаемые в курсе общей физики, знание которых поможет лучше понять использование этого физического явления в технике.

В методическом пособии показано достаточно большое количество рисунков различных технических устройств с принципом работы которых обучаемые могут познакомиться самостоятельно. В работе приводится только физика процесса, а инженерное решение за учащимися.

Текст пособия можно сделать более наглядным, воспользовавшись ссылками на видеотрегменты, размещенными в сети Интернет. В электронной версии учебного пособия для этого достаточно «включить содержимое»– разрешение запуска макросов, нажать CTRL и щелкнуть ссылку.

***Некоторые темы, достаточно подробно изложенные в курсе общей физики необходимо будет повторить самостоятельно, используя доступные учебники.***

***Внутри каждой темы имеются вопросы, выделенные курсивом и жирным шрифтом. Это вопросы для самостоятельной работы. Ответить на них с переписыванием самого вопроса нужно в рабочей тетради, сдаваемой на проверку. Если вы не знаете ответ на вопрос, то об этом так и заявляете. Пропускать вопросы нельзя!!!!***

**Тема 1 Силы в механике. Сложение и разложение сил в механизмах. Бесконечно большие силы. Центр тяжести. Вращения тела под действием пары сил. Простые механизмы. Передача усилий. Большие механизмы.**

Сила-физическая величина, характеризующая взаимодействие тел, в результате которого они либо изменяют направление движения, либо - величину скорости, либо деформируются. На практике чаще всего наблюдается проявление всех трех сущностей. Каждый из нас имеет собственное интуитивное представление о том, что такое сила. Любое определение может встретить возражения, но важным остается то, что сила меняет состояние движения тела и/или его формы. В технике силы являются движущими, совершающими работу. Источником силы является некоторое техническое устройство – двигатель. Для совершения работы эту силу необходимо преобразовывать, изменять её направление, раскладывать на составляющие или складывать с другими силами.

***Назовите виды сил, встречающиеся в механике.***

А можно ли увеличить эту силу? Можно ли из одной силы в 1 кг сделать две силы по 10 кг каждая? Можно ли силу в 1 кг разложить на две силы по 100 кг, по 1000 кг и т.д.?

Чтобы ответить на эти вопросы, надо вспомнить, как складываются и раскладываются силы, т. е. вспомнить правило параллелограмма сил. Оно гласит: равнодействующая двух сил, действующих на тело под углом друг к другу, изображается диагональю параллелограмма, построенного на векторах, изображающих силы. И наоборот, чтобы разложить силу по двум направлениям, надо через конец вектора силы провести линии, параллельные этим направлениям.

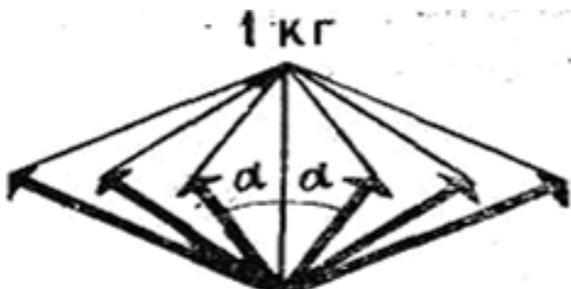


Рисунок 1.1 – Пример разложения силы в 1 кг на большие по величине силы.

Возьмем силу в 1 кг и разложим ее по двум направлениям, которые проведем под одинаковыми углами  $\alpha$  к направлению силы (рисунок 1.1). Как уже было сказано, для этого надо через конец вектора силы провести линии, параллельные этим направлениям. Выполнив это построение, мы вместо одной силы будем иметь две. Рисунок 1.1 показывает, что при увеличении угла  $\alpha$  сила в 1 кг превращается в две все большие и большие силы. В пределе, когда угол  $\alpha$

становится равным  $90^\circ$ , сила в 1 кГ раскладывается на две бесконечно большие силы. Таким образом, из одной силы в 1 кГ можно сделать две силы по 10 кГ, по 100 кГ. и т. д., вообще две любые по величине силы; для этого надо только соответствующим образом выбрать угол  $\alpha$ .

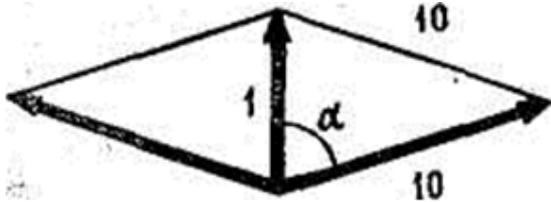


Рисунок 1.2 – Параллелограмм сил

$2 * 1 * 10 \cos \alpha$  (рисунок 1.2). Из этого уравнения легко найти  $\cos \alpha$ , а затем по тригонометрическим таблицам угол  $\alpha$ . Второй способ определения угла тоже достаточно прост. Сначала выбирают некоторый масштаб для изображения сил. Пусть, например, 1 см на чертеже соответствует силе в 1 кГ. Теперь надо нарисовать отрезок длиной в 1 см и, отмерив циркулем на линейке 10 см, сделать засечки, ставя одну из ножек циркуля в концы сантиметрового отрезка (рисунок 1.3). Через концы отрезка и засечки проводим прямые линии, которые и будут искомыми направлениями действия сил. Угол  $\alpha$  измеряется обычным транспортиром.



Рисунок 1.3 – Принцип построения параллелограмма сил.

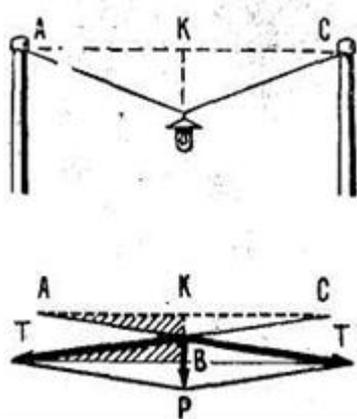


Рисунок 1.4. – Сила натяжения троса много больше веса светофора

(рисунок 1.4). Вес светофора 15 кг. Длина всего троса ABC 20 м, а отклонение точки подвеса фонаря от горизонтали BK составляет 0,1

Вычислить угол  $\alpha$  можно двумя способами. Пусть, например, силу в 1 кг нужно разложить на две силы по 10 кг. Построив параллелограмм сил, по теореме о стороне треугольника, лежащей против острого угла, можно записать, что  $10^2 = 1^2 + 10^2 -$

Таким образом, из любой по величине силы (сила в 1 кг была взята произвольно) можно сделать две какие угодно большие силы. Так утверждает теория. А так ли это на самом деле?

Рассмотрим пример: Светофор подвешен в точке B к середине троса ABC, прикрепленного концами к столбам в точках A и C, которые находятся на одной горизонтали

м. Определим натяжение троса. (Весом троса пренебрегаем.). Обозначим вес светофора буквой  $P$ , а натяжение троса — буквой  $T$ . Так как под действием веса светофора трос растягивается, можно построить параллелограмм сил. Легко сообразить, что заштрихованные треугольники на Рисунок. 1.4 подобны. Из подобия треугольников следует, что натяжение троса равно  $750 \text{ кГ}$ . (попробуйте определить это самостоятельно). Это в 50 раз больше веса самого светофора! Понятно, что, чем меньше будет провис  $BK$ , тем больше натяжение троса. Следовательно, ни один трос, провод, веревку нельзя натянуть строго горизонтально — всегда будет некоторый провис. Пусть даже на тросе ничего не висит, но ведь он имеет собственный вес, который можно считать приложенным в середине. Получается тот же самый параллелограмм сил. Если натягивать трос, то его провис уменьшается, и, следовательно, натяжение возрастает. Для того, чтобы трос занял строго горизонтальное положение, нужно приложить бесконечно большие силы. Таких сил нет в нашем распоряжении, но если бы мы даже умели их получать, все равно ни один трос не выдержал бы бесконечно большого натяжения. Он лопнул бы прежде, чем стал горизонтальным.

***Приведите примеры, как в механизмах происходит сложение и разложение сил.***

То, что провод нельзя натянуть строго горизонтально, вредное явление. Представьте себе, что строится высоковольтная линия для передачи электроэнергии из одного города в другой. Работа эта очень трудоемкая. Надо расчистить просеку, подготовить фундаменты для опор, установить ажурные металлические вышки,

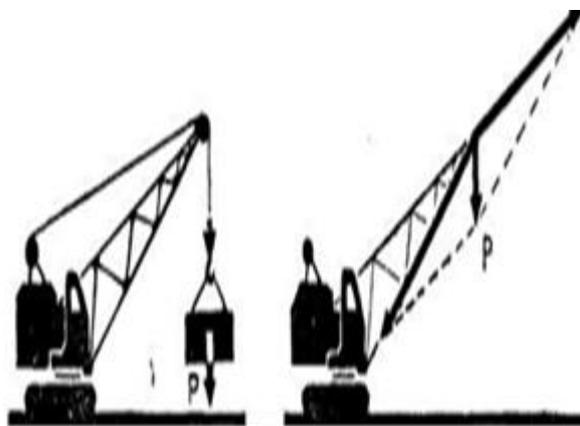


Рисунок 1.5. – Определение действующих сил.

подвесить «гирлянды» изоляторов, а к ним провода. Все это требует больших затрат, поэтому всегда хочется поставить как можно меньше опор. Но увеличивая расстояние между опорами, мы тем самым увеличиваем провис проводов, при этом возрастает вероятность их

схлестывания под действием ветра, что ведет к аварии. Вот инженерам и приходится думать: с одной стороны, надо поставить как можно меньше опор, чтобы не выбрасывать деньги на ветер, а с

другой стороны, если опор будет мало, тот же ветер может столкнуть два провода и вызвать короткое замыкание. А применять параллелограмм сил инженеру приходится на каждом шагу. Как, например, нужно крепить стрелу подъемного крана? Построив параллелограмм сил, инженер сразу видит, что нижнюю часть стрелы подъемного крана надо крепить на упор, а верхнюю — на вырыв (рисунок 1.5).

**Подумайте, можно ли реально получить бесконечно большую силу?**

Сложение

сил:

([https://www.youtube.com/watch?v=PtC1CRyFPF8&list=PL-Y315lhDX3FBrm0x\\_fGShfzHkauOa7vH&index=19](https://www.youtube.com/watch?v=PtC1CRyFPF8&list=PL-Y315lhDX3FBrm0x_fGShfzHkauOa7vH&index=19))

Разложение сил:

([https://www.youtube.com/watch?v=0AdHslDqi0I&list=PL-Y315lhDX3FBrm0x\\_fGShfzHkauOa7vH&index=30](https://www.youtube.com/watch?v=0AdHslDqi0I&list=PL-Y315lhDX3FBrm0x_fGShfzHkauOa7vH&index=30))

и ещё

([https://www.youtube.com/watch?v=KYzOtgR1aUU&list=PL-Y315lhDX3FBrm0x\\_fGShfzHkauOa7vH&index=13](https://www.youtube.com/watch?v=KYzOtgR1aUU&list=PL-Y315lhDX3FBrm0x_fGShfzHkauOa7vH&index=13)).

Пусть есть две параллельные или антипараллельные силы  $P$  и  $Q$  (рисунок 1.6). Равнодействующая двух таких сил равна или их сумме (в случае двух параллельных сил) или их разности (когда силы антипараллельны):  $R = P \pm Q$ , а точка приложения равнодействующей делит расстояние между линиями действия сил  $P$  и  $Q$  в отношении  $P : a = Q : b = R : l$  ( $l = a \pm b$ ). Так складываются параллельные и антипараллельные силы. Теперь представьте себе,

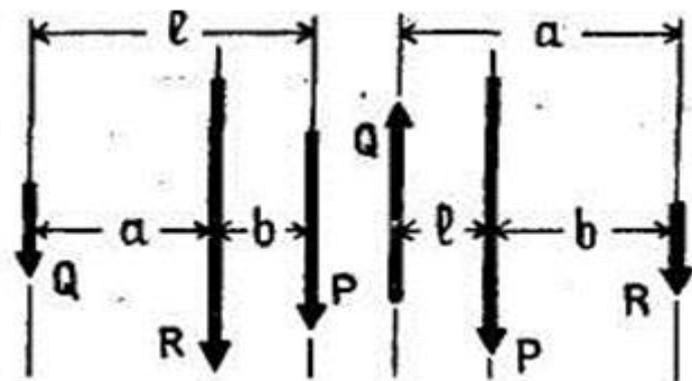


Рисунок 1.6. – Параллельные и антипараллельные силы.

что мы уменьшаем силу  $P$  (или, наоборот, увеличиваем силу  $Q$ ). В этом случае равнодействующая уменьшается, так как  $R = P - Q$ , а точка приложения ее отодвигается все дальше и дальше от сил  $P$  и  $Q$ . В пределе, когда сила  $P$

становится равной силе  $Q$ , равнодействующая обращается в ноль, а точка приложения ее уходит в бесконечность. Так получается математически. А что это означает физически? Опыт показывает, что когда на тело действуют две равные антипараллельные силы, приложенные к разным точкам тела (такие силы называются парой), тело вращается.

[https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=23&v=wEN0Sukn\\_n4&feature=emb\\_logo](https://www.youtube.com/watch?time_continue=23&v=wEN0Sukn_n4&feature=emb_logo). Например, заворачивая гайку, ввинчивая или вывинчивая шуруп, мы прикладываем пару сил (рисунок 1.7). Когда имеются две неравные антипараллельные силы, их можно свести к одной силе — равнодействующей, которая действует так же, как две данные силы. Под действием одной силы тело будет перемещаться, двигаться. Как только силы  $P$  и  $Q$  сравниваются, равнодействующая исчезает. Получается пара сил, которая будет вращать тело. Таким образом, предельный переход от двух антипараллельных сил к паре — это переход от перемещения к вращению, от одного вида механического движения к другому.

Действие пары сил на тело измеряется моментом, т. е. произведением одной из сил, образующих пару, на плечо (расстояние между линиями действия сил). Например, на рисунке 1.7 момент  $M$  равен  $P * l$ .

Вокруг какой точки вращает тело пара сил? Иногда считают, что пара сил вращает тело вокруг середины плеча. Это неверно.

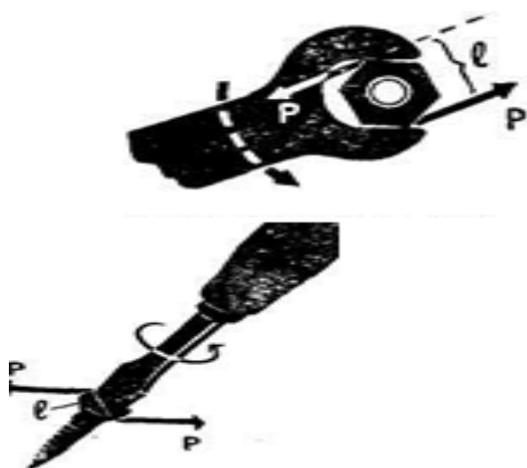


Рисунок 1,7 Примеры действия пары сил.

Пара сил вращает тело вокруг его центра тяжести. В этом легко убедиться на опыте.

***Проделайте такой опыт. Приведите примеры действия пары сил. Как движется тело под действием пары сил направленных в одну сторону?***

Чтобы определить, где расположен центр тяжести плоской однородной фигуры, обычно поступают следующим образом. Подвешивают фигуру последовательно за две различные точки и проводят через точки подвеса вертикальные линии. Пересечение их дает центр тяжести.

[https://www.youtube.com/watch?v=0TFyFIdL0-c&list=PL-Y315lhDX3FBrm0x\\_fGShfzHkauOa7vH&index=38](https://www.youtube.com/watch?v=0TFyFIdL0-c&list=PL-Y315lhDX3FBrm0x_fGShfzHkauOa7vH&index=38) ).

Если плоская фигура может быть представлена как сумма или разность простейших геометрических образов: треугольников, прямоугольников и т. п., то центр тяжести такой фигуры можно легко вычислить математически. Делается это при помощи так называемого метода площадей.

*Проделайте этот опыт на примере произвольной фигуры, вырезанной из картона. Сделайте рисунок и покажите действие пары сил. Какие это силы и почему центр тяжести лежит на пересечении линий подвеса? Убедитесь, что центр тяжести найден верно, подвесив фигуру точно в центре тяжести.*

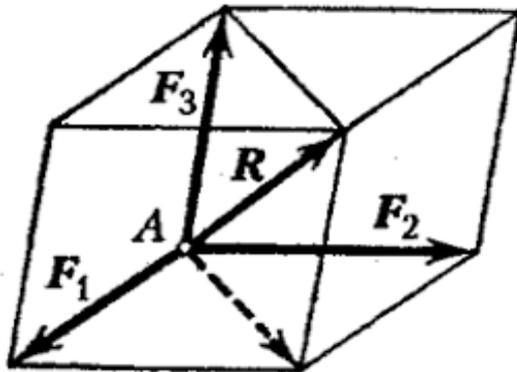


Рисунок 1.8. – Нахождение равнодействующей  $R$  трех сил  $F_1$ ,  $F_2$  и  $F_3$ , рассредоточенных в пространстве. Видно, что задача сводится к приведению любой пары сил в одну плоскость и нахождение равнодействующей.

В ней показано, что, несмотря на то, что к телу (возу) приложены силы, (Лебедь рвется в облака, рак пятится назад, а щука тянет в воду) движения тела не происходит (а воз и ныне там). Пример сложения пространственно-распределенных сил показан на рисунке 1.8.

Приведенные выше примеры показаны для сил находящихся в одной плоскости. Реально, в жизни, науке и технике мы чаще имеем дело с силами, расположенными в пространстве. Хороший пример пространственного сложения сил демонстрируется в широко известной басне Крылова «Лебедь, рак и щука».

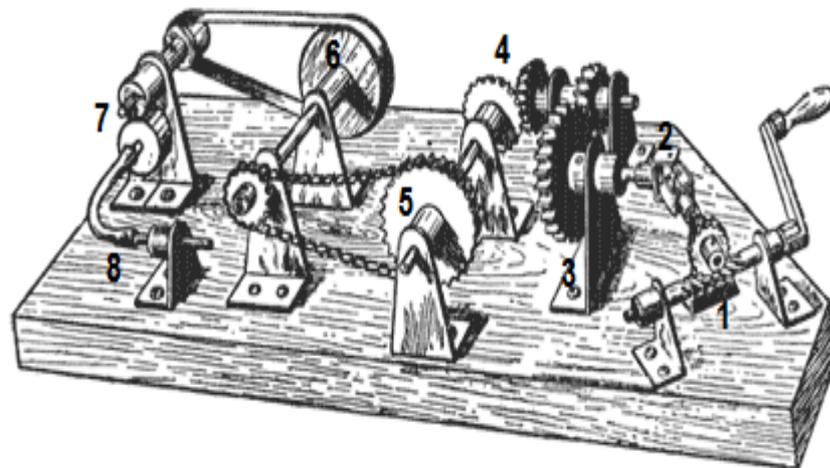


Рисунок. 1.9. – Механизмы передачи усилий, используемые в технике. 1- червячная; 2- карданная; 3- зубчатая прямая; 4- зубчатая угловая; 5- цепная; 6- ременная; 7-фрикционная; 8- тросовая.

Устройства, предназначенные для увеличения силы или изменения ее направления, называются механизмами. К

механизму прикладывается сила, которую он передает телам, перемещая их и выполняя работу.

Механизмы это инструменты, которые облегчают людям работу. Принято выделять восемь простейших механизмов, из которых четыре являются разновидностью двух *основных*:

*Наклонная плоскость* — простой механизм в виде плоскости, установленной под острым углом к горизонтальной поверхности.

Разновидность наклонной плоскости – клин — позволяет увеличить давление за счёт концентрации силы на малой площади. Используется в копье, лопате, пуле и др.

Другая разновидность наклонной плоскости – винт — используется в шурупах и для подъёма воды (Архимедов винт), в качестве сверла в дрелях и др.

*Рычаг* — описан Архимедом. Используется, в частности, для подъёма тяжестей, в качестве выключателей и спусковых крючков (шатун-кривошип — используется в ткацком станке, паровой машине, двигателях внутреннего сгорания).

Разновидность рычага– ворот — используется для подъёма воды в колодцах и для ременной передачи и др.

Блок — колесо с жёлобом, по которому пропускают верёвку, трос или цепь. Применяется для изменения величины или направления силы.

*Колесо* — используется на транспорте и в зубчатых передачах. Наиболее ранние находки колёс встречаются на территории современной Румынии (неолитическая культура Кукутени — Триполье) и датируются последней четвертью V тысячелетия до н. э.

*Поршень* — позволяет использовать энергию расширяющихся нагретых газов или пара. Применяется, в частности, в огнестрельном оружии, двигателе внутреннего сгорания и паровой машине.

С различными типами простых механизмов можно познакомиться на сайте: <https://interneturok.ru/lesson/physics/7-klass/rabota-moshnost-energija/prostye-mehanizmy>

Как уже говорилось, в технических устройствах источником силы является двигатель. Существует достаточно большое количество двигателей обычно классифицируемых по роду энергии, приводящей этот двигатель в действие (паровые, электрические, пневматические, гидравлические или водяные, мускульные и т.п.) или по принципу работы (внутреннего сгорания, реактивные и др.). Однако даже для работы самого двигателя необходимо часть силы, развиваемой двигателем,

направить на обеспечение работы самого двигателя. Например, в двигателе внутреннего сгорания необходимо осуществлять его охлаждение с помощью водяного насоса и вентилятора радиатора, вырабатывать электроэнергию для работы системы зажигания с помощью генератора, вращать насос системы смазки и т.п. Для этого используются механизмы передачи усилий и механизмы деления силы, в основе которых лежат простейшие механизмы. [https://www.youtube.com/watch?v=u4F\\_VHNY-Z0](https://www.youtube.com/watch?v=u4F_VHNY-Z0)

На рисунке 1.9 показан стенд, демонстрирующий различные механизмы передачи сил, наиболее часто используемых в технических устройствах.

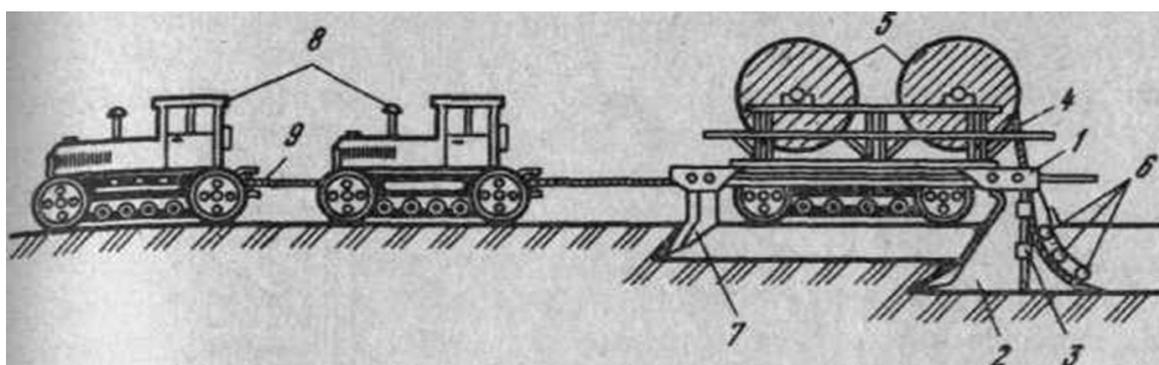


Рисунок 1.10. – Сложение сил нескольких механизмов

При выполнении какой – либо работы часто возникает ситуация, когда силы одного двигателя оказывается недостаточно для выполнения работы. Вспомните хотя бы пример из собственной практики, когда нужно перенести какую-то тяжелую вещь, например, холодильник. В таких случаях мы призываем себе на помощь еще кого – то, используя сложение двух или более сил, в общем случае, развиваемых разными двигателями, в нашем примере – людьми.

В технике поступают так же. На рисунке 1.10. показан пример использования двух тракторов, движущихся «цугом», когда сцепляют несколько машин.

Однако и в случае переноски тяжести и в случае сцепки нескольких тракторов возникает проблема синхронизации и движения и сил. Легко представить, как будет меняться равнодействующая трех сил, показанная на рисунке 1.8, если хоть одна из сил будет меняться по величине или по направлению, а чаще всего по обоим параметрам.

Поэтому в технике для выполнения работы, требующей больших, а точнее громадных, усилий поступают по-другому.

Просто изготавливают механизм с одним двигателем, но способным развить требуемую силу, нежели складывать силу нескольких двигателей. На рисунке 1.11 показан самосвал БЕЛАЗ 75710, служащий демонстрацией сказанному.



Рисунок 1.11. – Выпущенный на заводе ОАО «БелАЗ» (Белоруссия), самый крупный в мире по размеру и грузоподъемности карьерный самосвал Грузоподъемность—450 тонн! Это рекорд, ближайшие конкуренты из Америки и Европы способны максимум на 363 тонны.

Приведенные примеры показывают, что в технике используют разные виды сил. Для разложения сил используют различного рода коробки перемены передач, механизмы передачи при помощи ремней, цепей и пр. В то же время в технике процесс сложения сил от разных источников существует, но оказывается более сложным, так как возникает необходимость строгой синхронизации движения источников сил.

***Приведите примеры сложения и разложения сил в механизмах. Покажите это схематически.***

**Тема 2 Упругие силы и использование их в технике.  
Упругое последствие. Реологические свойства. Удар.  
Коэффициент восстановления. Использование энергии удара.  
Ударные механизмы в технике.**

Рассматривая механику твердого тела, мы пользовались понятием абсолютно твердого тела. Таким телом называется тело, расстояние между любыми точками которого остается постоянным при действии на это тело внешних сил. Однако в природе абсолютно твердых тел нет, так как все реальные тела под действием сил изменяют свою форму и размеры, т. е. деформируются.

Деформация называется упругой, если после прекращения действия внешних сил тело принимает первоначальные размеры и форму. Деформации, которые сохраняются в теле после прекращения действия внешних сил, называются пластическими (или остаточными). Деформации реального тела всегда пластические, так как они после прекращения действия внешних сил никогда полностью не исчезают.

Рассмотрим упругое тело в форме куба.

Приложенное напряжение (действие силы на верхнюю поверхность) вызывает мгновенную деформацию (частицы тела смещаются одна относительно другой). Эта деформация остается до тех пор, пока сохраняется нагрузка. При снятии нагрузки деформация полностью исчезает (частицы тела снова занимают свои прежние места).

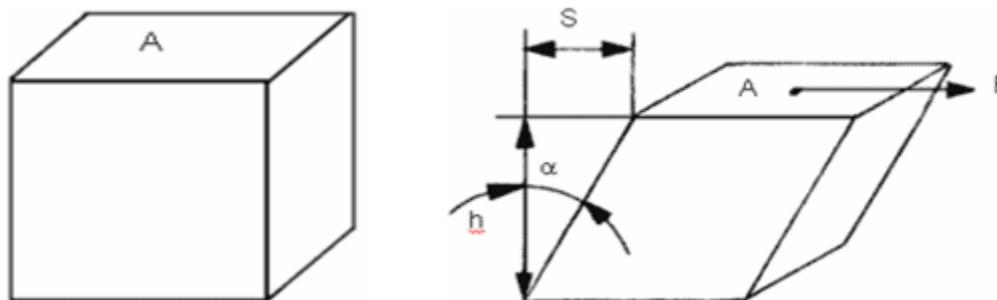


Рисунок 2.1. – Абсолютно упругое тело без действия на него силы (слева) и под действием силы (справа)

На верхнюю поверхность  $A$  действует сила  $F$ . Верхняя поверхность переместится на расстояние  $s$ . Отношение силы  $F$  к площади  $A$  называется напряжением сдвига  $t$  или касательным (тангенциальным) напряжением.  $\tau = F / A$ , единица измерения:  $\text{Н/м}^2 = \text{Па}$

Отношение смещения  $s$  к расстоянию  $h$  называется деформацией  $g$  или изменением формы.

$$\gamma = s/h = \operatorname{tg} \alpha \quad (2.1)$$

Деформация величина безразмерная.

Отношение напряжения сдвига  $\tau$  к деформации  $g$  представляет собой модуль  $G$ . Он часто называется модулем сдвига и соответствует обратной величине упругой деформации  $J$ .

$$G = \tau / \gamma \text{ Единица измерения: Па}$$

$$J = \gamma / \tau \text{ Единица измерения: 1/Па}$$

Модуль  $G$  является характерным параметром вещества для чисто упругих тел. На растягивающую нагрузку или усилие сжатия упругое тело реагирует как пружина. В теории упругости доказывается, что все виды деформаций (растяжение или сжатие, сдвиг, изгиб, кручение) могут быть сведены к одновременно происходящим деформациям растяжения или сжатия и сдвига.

Сила, действующая на единицу площади поперечного сечения, называется напряжением:

$$\sigma = F/S. \quad (2.2)$$

Если сила направлена по нормали к поверхности, напряжение называется нормальным, если же по касательной к поверхности — тангенциальным.

Количественной мерой, характеризующей степень деформации, испытываемой телом, является его относительная деформация.

Так, относительное изменение длины стержня (продольная деформация)

$$\varepsilon = \Delta l/l, \text{ — относительное поперечное растяжение(сжатие)}$$

$$\varepsilon' = \Delta d/d, \text{ где } d \text{ — диаметр стержня.} \quad (2.3)$$

Деформации  $\varepsilon$  и  $\varepsilon'$  всегда имеют разные знаки (при растяжении  $\Delta l$  положительно, а  $\Delta d$  отрицательно, при сжатии  $\Delta l$  отрицательно, а  $\Delta d$  положительно). Из опыта вытекает взаимосвязь  $\varepsilon$  и  $\varepsilon'$ :  $\varepsilon' = -m\varepsilon$ , где  $m$  — положительный коэффициент, зависящий от свойств материала, называемый коэффициентом Пуассона.

**Какие виды деформаций Вы можете назвать? Приведите примеры деформированных состояний в природе, технике и быту.**

Английский физик Р. Гук (1635— 1703) экспериментально установил, что для малых деформаций относительное удлинение  $\varepsilon$  и напряжение  $\sigma$  прямо пропорциональны друг другу:

$\sigma = E\varepsilon$ , где коэффициент пропорциональности  $E$  называется модулем Юнга.

Из выражения видно, что модуль Юнга определяется напряжением, вызывающим относительное удлинение, равное единице.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma}{E} = \frac{F}{E \cdot S}; \quad \text{отсюда} \quad F = \frac{E \cdot S}{l} \Delta l = k \Delta l \quad (2.4)$$

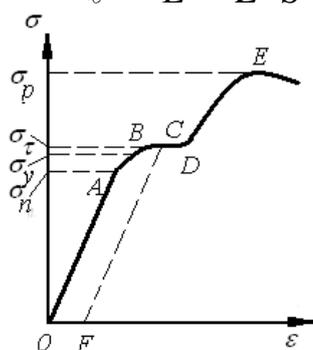


Рисунок.2.2. – Диаграмма напряжений

где  $k$  — коэффициент упругости. Это выражение также задает закон Гука, согласно которому удлинение стержня при упругой деформации пропорционально действующей на стержень силе.

Деформации твердых тел подчиняются закону Гука до известного предела. Связь между деформацией и напряжением

представляется в виде диаграммы напряжений, которую мы качественно рассмотрим для металлического образца. Из рисунка 2.2 видно, что линейная зависимость  $\sigma(\varepsilon)$ , установленная Гуком, выполняется лишь в очень узких пределах до так называемого предела пропорциональности ( $\sigma_p$ ). При дальнейшем увеличении напряжения деформация еще упругая (хотя зависимость  $\sigma(\varepsilon)$  уже не линейна) и до предела упругости ( $\sigma_y$ ) остаточные деформации не возникают. За пределом упругости в теле возникают остаточные деформации и график, описывающий возвращение тела в первоначальное состояние после прекращения действия силы, изобразится не кривой ВО, а параллельной ей — СF. Напряжение, при котором появляется заметная остаточная деформация ( $\sim 0,2\%$ ), называется пределом текучести ( $\sigma_T$ ) — точка С на кривой. В области CD деформация возрастает без увеличения напряжения, т. е. тело как бы «течет». Эта область называется областью текучести (или областью пластических деформаций). Материалы, для которых область текучести значительна, называются вязкими, для которых же она практически отсутствует — хрупкими. При дальнейшем растяжении (за точку D) происходит разрушение тела. Максимальное напряжение,

возникающее в теле до разрушения, называется пределом прочности ( $\sigma_p$ ).

Диаграмма напряжений для реальных твердых тел зависит от различных факторов. Одно и то же твердое тело может при кратковременном действии сил проявлять себя как хрупкое, а при длительных, но слабых силах является текучим. Потенциальная энергия упруго растянутого (сжатого) стержня:

$$U = \int_0^{\Delta \ell} \frac{ES}{\ell} \cdot x \cdot dx = \frac{ES}{2\ell} (\Delta \ell)^2 \quad (2.5)$$

т. е. потенциальная энергия упруго растянутого стержня пропорциональна квадрату деформации  $(\Delta \ell)^2$   
<https://www.youtube.com/watch?v=1LSAKSEEvIU> ).

Если металл деформировать до появления пластических деформаций, а затем их снять, то, как показывает опыт, при дальнейшем нагружении пластические деформации появляются при более высоких напряжениях материала (точка D на графике рисунок 2.3). Происходит увеличение прочности металла или наклеп.

Наклеп как вид поверхностного упрочнения, в десятки раз

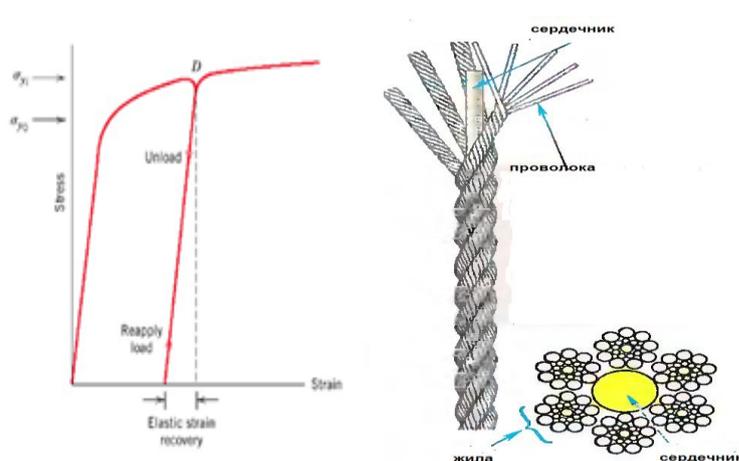


Рисунок.2.3. – Образование наклепа и использование в тросе

повышает долговечность и надежность деталей, пользуется заслуженной популярностью среди производителей.

Чаще всего наклеп

выполняют с помощью дробеструйных установок, но она не только громоздкие и дорогие, но дробеструйкой трудно регулировать глубину и качество будущего наклепанного слоя. В институте подшипниковой промышленности предложили на кольца подшипников качения с высоты около двух метров сыпать дождь стальных шариков. Долговечность подшипников увеличивается в 2 - 3 раза. Правда, обрабатывать детали нужно в течение 1,5 часа. Использование дробеструйки для создания наклепа на деталях, как было показано в примере, плохо управляемый процесс. В

дробеструйной установке для дробеметания используют центробежное поле. Установка представляет собой горизонтальное колесо с отверстиями на ободу, из которых под действием центробежных сил непрерывно летят стальные шарики диаметром 0,05-0,3 мм. Вокруг колеса в шпинделях закрепляют изделия, вращающиеся вокруг своей оси и центральной оси установки. Благодаря таким сложным движениям достигается высокая равномерность обработки всей поверхности деталей типа лопаток турбин, зубчатых колес, шлицевых валиков. Увеличивается долговечность детали в 5-8 раз и на 20% -усталостная прочность. Трудоемкость процесса сокращается в 20-25 раз.

[https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=6&v=ygyd0tXhweQ&feature=emb\\_logo](https://www.youtube.com/watch?time_continue=6&v=ygyd0tXhweQ&feature=emb_logo)

[http://www.aoks-spb.com/catalogue/technology/drobestruynoe-uprochnenie-shot-peening-\(shotpining\)](http://www.aoks-spb.com/catalogue/technology/drobestruynoe-uprochnenie-shot-peening-(shotpining))

Благодаря появлению наклепа при изготовлении проволоки методом волочения, тонкая проволока обладает большей прочностью, чем толстая, так как в тонкой проволоке большая часть ее упрочнена. Этим объясняется повсеместное использование тросов и канатов, поскольку канат намного прочнее сплошного стержня при одинаковых поперечных сечениях (рисунок 2.3).

Для снятия наклепа детали производят так называемый отжиг. Детали нагревают до температуры 400-600 градусов и медленно охлаждают.

Проследим, как изменяется относительное удлинение образца при нагрузках, не превышающих предела пропорциональности. При деформации тел внешняя сила, вызывающая деформацию, совершает работу. С другой стороны, деформированное тело при исчезновении деформации само совершает работу. Если бы деформируемое тело было абсолютно упруго, то оно могло бы совершить такую же работу, которая была затрачена на деформацию тела. В абсолютно упругих телах вся работа, затраченная на деформацию тела, идет на увеличение потенциальной энергии упругой деформации. В реальных телах это не имеет места: возникающие в них силы всегда зависят не только от величин деформаций, но и от скорости изменения деформаций. Эти силы подобны силам трения (их обычно и называют «внутренним трением»). Внутреннее трение в твёрдых телах, свойство твёрдых тел необратимо превращать в теплоту механическую энергию, сообщенную телу в процессе его деформирования. Внутреннее трение связано с двумя различными группами явлений — неупругостью и пластической деформацией

[https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=3&v=IBZwnqJ1F44&feature=emb\\_logo](https://www.youtube.com/watch?time_continue=3&v=IBZwnqJ1F44&feature=emb_logo). Неупругость представляет собой отклонение от

свойств упругости при деформировании тела в условиях, когда остаточные деформации практически отсутствуют. При деформировании с конечной скоростью в теле возникает отклонение от теплового равновесия. Например, при изгибе равномерно нагретой тонкой пластинки, материал которой расширяется при нагревании, растянутые волокна охладятся, сжатые — нагреются, вследствие чего возникнет поперечный перепад температуры, т. е. упругое деформирование вызовет нарушение теплового равновесия. Последующее выравнивание температуры путём теплопроводности представляет собой процесс, сопровождаемый необратимым переходом части упругой энергии в тепловую. Такой процесс восстановления нарушенного равновесия называется релаксацией. С этим связано и наличие остаточных деформаций во всяком реальном теле. Поскольку реальное тело не восстанавливает полностью своей формы, оно не отдает полностью и всей той работы, которая была затрачена на деформацию. Однако для многих реальных тел при малых деформациях остаточные деформации столь малы, что ими можно пренебречь и считать, что вся работа, совершенная силами, вызвавшими деформацию, целиком превращается в энергию упругой деформации. В таком случае энергию упругой деформации деформированного тела можно подсчитать следующим образом. Положим, что тело подвергается медленному растяжению. Выделим в деформируемом теле элемент объема в виде куба. Энергию упругой деформации всего деформированного тела мы получим, просуммировав энергию всех элементов объема тела.

***Приведите примеры из Вашего жизненного опыта, как подтверждение вышесказанному.***

Наличие остаточных деформаций при переменных деформациях сказывается в том, что при обратном ходе тем же самым деформациям соответствуют меньшие напряжения. Поэтому кривая  $\sigma = f(\epsilon)$  при обратном ходе деформации проходит ниже, чем при прямом (рисунок 2.4). Напряжение в теле исчезает до того, как исчезла деформация, — при  $\sigma = 0$  в теле существует остаточная деформация  $\epsilon_0$ . Если продолжать деформировать тело в другом направлении, то остаточная деформация исчезнет только тогда, когда в теле будет уже существовать некоторое напряжение  $\sigma$ . Это явление носит название упругого гистерезиса. При периодически повторяющихся деформациях изменения  $\sigma$  и  $\epsilon$  изображаются замкнутой кривой 1234561, которая называется петлей гистерезиса. При деформации тела от 1 до 3 будет совершена работа большая, чем та, которую отдаст тело при обратном ходе от 6 до 1. Разность этих работ, идущая на нагревание тела, выразится площадью верхней части петли гистерезиса. Точно так же при деформации 6543 работа, идущая на нагревание тела, выразится нижней частью петли

гистерезиса. При периодически меняющейся деформации за каждый цикл выделяется тепло, пропорциональное площади петли гистерезиса. Чем больше площадь петли гистерезиса, тем сильнее нагревается тело при периодических деформациях.

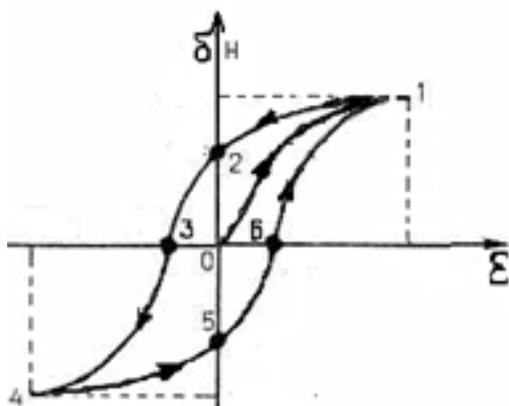


Рисунок 2.4 – Петля механического гистерезиса

При быстро повторяющихся деформациях за единицу времени в теле выделяется заметное количество тепла. Вследствие этого тела, подвергающиеся быстрым периодическим деформациям, всегда в большей или меньшей степени нагреваются. Для уменьшения этого нагрева (которое может еще более ухудшить упругие свойства материала) ответственные детали

машин, подвергающиеся быстрым периодическим деформациям (например, пружины клапанов в двигателях внутреннего сгорания), делаются из специальных сортов стали, в которых площадь петли гистерезиса очень мала.

***Приведите примеры технических устройств, в которых использовалось бы это свойство материала?***

При загрузке стержня (рисунок 2.5 слева) в момент времени  $t_0$  его относительная деформация увеличивается от А до В (рисунок 2.5 справа). С течением времени деформации стержня возрастают (кривая ВС), причём в общем случае происходит прирост как упругих, так и пластических деформаций. Это явление называется прямым последствием. Приращение упругих деформаций — это проявление упругого последствия, пластических деформаций — ползучести. Если в некоторый момент времени  $t_1$  нагрузка снимается, то образец сразу сокращается на величину упругой деформации (CD), а затем наблюдается медленное сокращение образца со временем (DE) — т. н. обратное последствие. Явление носит название упругое последствие - явление релаксации, состоящее в изменении с течением времени деформированного состояния твердого тела при неизменном напряженном состоянии. Упругое последствие характеризуется однозначностью условий равновесия (полная восстанавливаемость) между напряжением и деформацией, равновесное значение которой достигается по истечении достаточного времени. Продолжительность изменения - время релаксации - зависит от способа и температуры деформации, а также от предыстории и свойства твердого тела.

Упругое последствие без ползучести наблюдается в телах, напряжённое состояние которых нигде не превосходит предела упругости, и относится к медленным обратимым процессам. Обычно упругое последствие материалов объясняется неоднородностью упруго-напряжённого состояния реальных тел и стремлением напряжённого состояния к выравниванию; оно объясняет явление упругого гистерезиса.

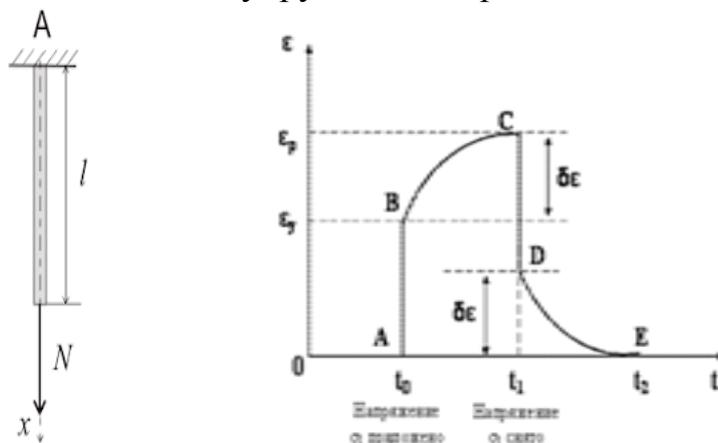


Рисунок 2.5. – Диаграмма упругого последствия

Для металлов упругое последствие мало, однако у органического веществ (кожа, текстильные волокна, пластической массы) оно может иметь значительную величину. Изучением

последствия занимается реология. <https://studizba.com/lectures/129-inzhenerija/1934-mehanicheskie-svoystva-materialov/37852-5-nepolnaja-uprugost-metallov.html>

**Приведите примеры проявления этого явления в технике и обыденной жизни.**

**Удар** твёрдых тел, совокупность явлений, возникающих при столкновении движущихся твёрдых тел, а также при некоторых видах взаимодействия твёрдого тела с жидкостью или газом (удар струи о тело, удар тела о поверхность жидкости, гидравлический удар, действие взрыва или ударной волны на твёрдое тело и др.). Промежуток времени, в течение которого длится удар, обычно очень мал (на практике от нескольких десятитысячных до миллионных долей сек), а развивающиеся на площадках контакта соударяющихся тел силы (называются ударными или мгновенными) очень велики. Изменяются они за время удара в широких пределах и достигают значений, при которых средние величины давления (напряжений) на площадках контакта имеют порядок  $10^6$  и даже  $10^8$  Па. Действие ударных сил приводит к значительному изменению за время удара скоростей точек тела. Следствиями удара могут быть также остаточные деформации, звуковые колебания, нагревание тел, изменение механических свойств

их материалов и др., а при скоростях соударения, превышающих критические, — разрушение тел в месте удара. Порядок критических скоростей для металлов - 15 м/сек (медь) — 150 м/сек и более (высококачественные стали).

Процесс удара обычно разделяют на две фазы. Первая фаза - с момента соприкосновения тел до момента, когда относительная скорость центра масс тел становится равной нулю. При этом происходит переход кинетической энергии в потенциальную энергию упругой деформации. Во второй фазе происходит частичное или полное восстановление формы тел. Относительная скорость тел возрастает по абсолютной величине, наконец, тела расходятся, и удар заканчивается. Во второй фазе происходит обратный переход потенциальной энергии упругой деформации в кинетическую энергию. У реальных тел относительная скорость после удара не достигает того значения, которое имелось до удара, так как часть кинетической энергии тел переходит в тепловую, в энергию остаточной деформации и другие виды энергии.

При абсолютно упругом ударе механическая энергия не переходит в другие виды энергии. В первой фазе удара кинетическая энергия переходит в потенциальную энергию упругой деформации, во второй - энергия упругой деформации переходит в кинетическую. При этом выполняется закон сохранения механической энергии  $W_k + W_n = \text{const}$ .

***Вам необходимо просмотреть соответствующую тему в учебниках физики.***

При ударе реальных тел механическая энергия к концу удара восстанавливается лишь частично вследствие потерь на нагревание тел, сообщение остаточных деформаций, излучение звуковых волн и т.д.

Кинетическая энергия системы из двух тел может быть представлена следующим образом:

$$W_k = \frac{(m_1 + m_2)v_c^2}{2} + \frac{m_1 m_2}{2(m_1 + m_2)} (\vec{V}_1 - \vec{V}_2)^2, \quad (2.6)$$

***Получите эту формулу, исходя из законов сохранения энергии и импульса.***

где  $v_c$  - скорость центра инерции системы, которая не изменяется при ударе, так как система замкнутая. При ударе может уменьшиться значение только второго члена в формуле (1). Таким образом, потеря кинетической энергии при неупругом ударе приводит к уменьшению

относительной скорости шара  $|\bar{v}_1 - \bar{v}_2| < |\bar{v}_{01} - \bar{v}_{02}|$ . Индекс с нулем относится к скоростям тел до удара.

Для учета потерь механической энергии удобно ввести коэффициент восстановления, как отношение изменения скоростей соударяющихся тел после удара и до удара.

$$K = \frac{\bar{v}_1 - \bar{v}_2}{\bar{v}_{01} - \bar{v}_{02}} = \frac{|\bar{v}_1 - \bar{v}_2|}{|\bar{v}_{01} - \bar{v}_{02}|}, \quad (2.7)$$

где  $K$  - интегральная характеристика физических свойств веществ соударяющихся тел. Значение  $k$  определяется экспериментально, например измерением высоты  $h$ , на которую отскакивает шарик, свободно падающий на горизонтальную плиту с высоты  $H$ ; в этом случае

$$k = \sqrt{\frac{h}{H}} \quad (2.8)$$

По данным опытов, при соударении тел из дерева  $k = 0,5$ , из стали —  $0,55$ , из слоновой кости —  $0,89$ , из стекла —  $0,94$ . В предельных случаях при совершенно упругом ударе  $k = 1$ , а при совершенно неупругом  $K = 0$ . При неупругом ударе ( $0 < K < 1$ ) скорости шаров после удара можно найти из закона сохранения импульса из уравнения (2):

$$m_1 \bar{v}_{01} + m_2 \bar{v}_{02} = m_1 \bar{v}_1 + m_2 \bar{v}_2, \quad (2.9)$$

Применив формулу (2), получим:

$$\bar{v}_1 - \bar{v}_2 = -K (\bar{v}_{01} - \bar{v}_{02}). \quad (2.10)$$

Решив систему уравнений (2.9) и (2.10), получим уравнения, определяющие скорости тел после удара.

$$\bar{v}_2 = \bar{v}_{02} + \frac{m_1(1+K)}{m_1 + m_2} (\bar{v}_{01} - \bar{v}_{02}), \quad (2.11)$$

$$\bar{v}_1 = \bar{v}_{01} + \frac{m_2(1+K)}{m_1 + m_2} (\bar{v}_{02} - \bar{v}_{01}).$$

На практике удар используют либо для создания движения (забивание гвоздя в доску, вбивание сваи в грунт, насаживание одной детали на другую и т. п.), либо для деформации тела (ковка, пробивание отверстий, заклепывание деталей и т.п.). Израсходованная на это кинетическая энергия системы вычисляется по формуле

$$W_{\text{ко}} - W_k = \frac{(1-K)^2}{2} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (\bar{v}_{01} - \bar{v}_{02})^2. \quad (2.12)$$

Чаще всего на практике при ударе одно из тел до удара неподвижно ( $\bar{v}_{02}=0$ ), то

$$W_{\text{ко}} - W_k = (1-K)^2 \frac{m_2}{m_1 + m_2} \frac{m_1 V_{01}^2}{2} = (1-K)^2 \frac{m_2 W_{\text{ко}}}{m_1 + m_2}, \quad (2.13)$$

где  $W_{\text{ко}}$ ,  $W_k$  кинетические энергии системы до и после удара, соответственно.

Если удар используется для создания движения, то кинетическая энергия системы после удара  $w_k$  должна быть максимально большой, а выражение в правой части уравнения (2.13) минимальным. Этого можно достичь, если будет максимально большим коэффициент восстановления  $K$ , а масса ударяющего тела  $m_1$ , будет много больше массы  $m_2$ .

Если же удар используется для деформации тела, то наоборот, кинетическая энергия системы после удара  $w_k$  должна быть минимальной, а выражение в правой части уравнения (2.13) должно быть максимально большим. Это будет достигнуто, если  $K$  будет стремиться к нулю, а масса неподвижного тела (например, поковки) будет максимально большой. На практике ковку производят на массивной наковальне.

Удар широко используется в технике, так как при ударе развиваются значительные мощности. Парк таких машин представлен достаточно широко.

***Сделайте список такого парка машин и приспособлений, в том числе и используемыми в быту.***

[https://www.youtube.com/watch?v=fb\\_4W7UfiIk](https://www.youtube.com/watch?v=fb_4W7UfiIk)

Изменение скоростей точек тела за время удара определяется методами общей теории удара, где в качестве меры механического взаимодействия тел при ударе. вместо самой ударной силы  $P$  вводится так называемый ударный импульс  $S$ .

$S = P_{\text{ср}} \cdot t$ , где  $P$ — ударная сила,  $P_{\text{ср}}$  — среднее значение ударной силы во время удара, а  $t$ — время удара.

Одновременно, ввиду малости  $m$ , импульсами всех неударных сил, таких, например, как сила тяжести, а также перемещениями точек тела за время удара пренебрегают. Основные уравнения общей теории удара вытекают из теорем об изменении количества движения и кинетического момента системы при ударе. С помощью этих теорем, зная приложенный ударный импульс и скорости в начале удара, определяют скорости в конце удара, а если тело является

несвободным, то и импульсивные реакции связей. Решение проблемы существенно усложняется не только из-за трудностей чисто математического характера, но и ввиду отсутствия достаточных данных о параметрах, определяющих поведение материалов тел при ударных нагрузках, что заставляет делать при расчётах ряд существенных упрощающих предположений

Изучение удара не вполне упругих тел — задача значительно более сложная, требующая учёта как упругих, так и пластических свойств материалов. При решении этой задачи и связанных с ней проблем определения механических свойств материалов тел при ударе, изучения изменений их структуры и процессов разрушения широко опираются на анализ и обобщение результатов многочисленных экспериментальных исследований. Экспериментально исследуются также специфические особенности удара тел при больших скоростях (порядка сотен м/сек) и при воздействии взрыва, который в случае непосредственного контакта заряда с телом можно считать эквивалентным соударению со скоростью до 1000 м/сек.

Отдельно стоит гидравлический удар,— удар, образованный движущейся жидкостью при ее резкой остановке и изучаемый в разделе физики «гидравлика».

**Тема 3 Сила трения. Формула Кулона - Амантона и ее следствия. Экспериментальное определения коэффициентов трения и применение в технике. Конус трения. Использование в технике. Болтовые соединения и самоконтрящиеся гайки. Применение в механизмах. Формула Эйлера. Передача усилий гибкими связями. Ременные и тросовые передачи.**

Трением называется сопротивление возможному или действительному перемещению соприкасающихся тел, возникающему в месте их соприкосновения.

По кинематическим признакам различают трение скольжения (трение 1-го рода) и трение качения (трение 2-го рода). Трение скольжения еще подразделяют на сухое и жидкое.

<https://www.youtube.com/watch?v=vJos0-HBek0>

Трение подошв человека о землю, о чем основана возможность его передвижения, является примером трения скольжения. Примером же трения качения является трение при перекачивании колес вагона по рельсам. Многие обычные способы передвижения были бы совершенно невозможны при отсутствии трения. К этому можно прибавить, что при отсутствии трения гвозди и винты выскальзывали бы из стен, не одной вещи нельзя было бы удержать в руках, никакой вихрь никогда бы не прекращался, никакой звук не умолка, а звучал бы бесконечным эхом, неослабно отражаясь, например, от стен комнаты. Наглядный урок, убеждающий нас в огромной важности трения, дает нам каждый раз гололедица. Застигнутые ее на улице мы оказываемся беспомощны. Явление трения обусловлено множеством факторов механического, внутримолекулярного, термического, электрического и т.д. характера. Трение – следствие многих причин, но основными из них являются две. Во-первых, поверхности тел всегда неровны, и выступающие части поверхностей задевают друг за друга и препятствуют движению тела. (Даже самые гладкие на глаз поверхности оказываются под микроскопом шероховатыми, с впадинами и выступами.) Именно поэтому для движения по гладким (полированным) поверхностям требуется прикладывать меньшую силу, чем для движения по шероховатым. Это так называемое геометрическое трение. Во-вторых, трущиеся тела очень близко соприкасаются друг с другом, и на их движение оказывает влияние взаимодействие молекул (молекулярное трение). Это означает, что причиной её возникновения являются силы взаимодействия между частицами, из которых состоит вещество. Опыт показывает, что аксимальная сила трения  $f_0$  равна  $f_0 = \mu N$ ,

где  $\mu$  - безразмерный коэффициент, коэффициент силы трения, зависящий от свойств соприкасающихся поверхностей. Это

выражение носит название закона Амантона, который установил его в 1699 г. опытным путем. Несколько позже Шарль Кулон (1736-1806) установил основные приближенные законы для сухого трения скольжения при покое. Эти законы справедливы, когда поверхности тел не вдавливались друг в друга, а их шероховатость была не слишком велика. По этой причине вышеприведенную формулу часто называют законом Кулона – Амантона, но чаще – как закон Кулона для трения.

Законы Кулона можно установить на приборе, схема которого дана на рисунке 3.1. Изменяя вес гири  $Q$ , можно изменять тяговую (сдвигающую) силу  $T$  ( $T = Q$ ), которая стремится двигать тело вдоль поверхности другого тела, являющегося *связью*. Если силу  $T$

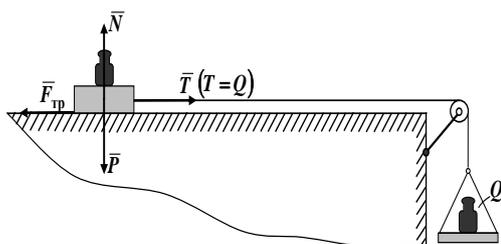


Рисунок 3.1. – Установка для изучения законов трения

увеличивать, то по условию равновесия возникнет сила трения  $F_{тр}$ , причем  $\vec{F}_{тр} = -\vec{T}$ . Можно достичь положения, когда сила  $T$  выведет тело из равновесия, и оно будет скользить по поверхности связи. В предельном положении

равновесии тела сила трения становится максимальной и не может уравновесить силу  $T$  при ее дальнейшем увеличении

(<https://infourok.ru/videouroki/436>)

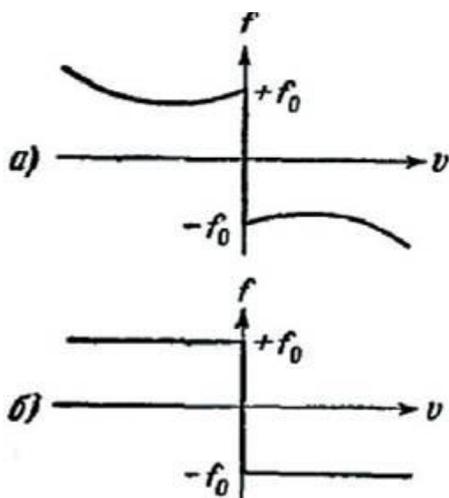


Рисунок 3.2 – Зависимость силы трения от скорости. а – реальная, б - при малых скоростях.

Вообще сила трения при скольжении будет вначале падать, а затем возрастет с увеличением скорости (рисунок 3.2 а). При скорости равной нулю, т.е. в покое, возможно любое значение силы трения от  $-f_0$  до  $+f_0$ . Далее, с увеличением скорости сила трения на некотором участке изменения скорости остается постоянной, а затем медленно падает, достигает минимума, после которого начинается подъем (см. рисунок).

При достаточно малых скоростях скольжения силу трения сухих металлических тел можно считать постоянной, не зависящей от скорости и равной силе трения покоя.

Вообще - то силы сопротивления при относительном движении тел наблюдаются и в жидкостях. Эти силы называются силами жидкого трения. Они возникают при относительном перемещении твердого тела и жидкости или слоёв жидкости. Причем эти силы зависят от относительной скорости тела и жидкости (или газа). Главной особенностью жидкого трения является полное отсутствие в жидкостях сил трения покоя. Это обстоятельство демонстрирует приведенный рисунок 3.3. Движение тел в жидкостях и газах будет рассмотрено позднее.

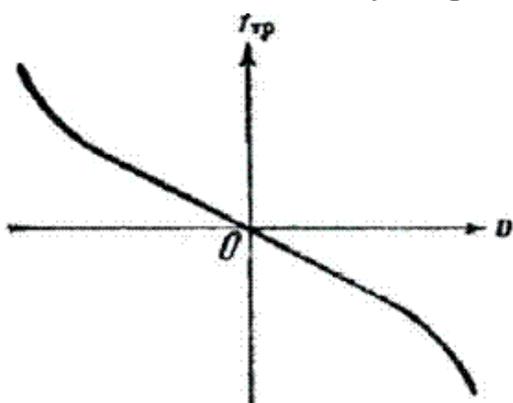


Рисунок 3.3. – Зависимость силы жидкого трения от скорости

Быстро развивавшаяся техника XX века требовала все большего внимания к исследованию трения. В 1930 - е годы исследования в области трения стали настолько интенсивными, что потребовалось выделить их как специальную науку — трибологию, лежащую на стыке наук механики, физики поверхностных явлений химии (создание новых смазочных материалов).

<https://www.youtube.com/watch?v=nw2n93Jljzc>

Основы трибологии опираются на топографию поверхностей контактирующих между собой частей реальных механизмов. Эти поверхности никогда не являются идеально плоскими, имеют

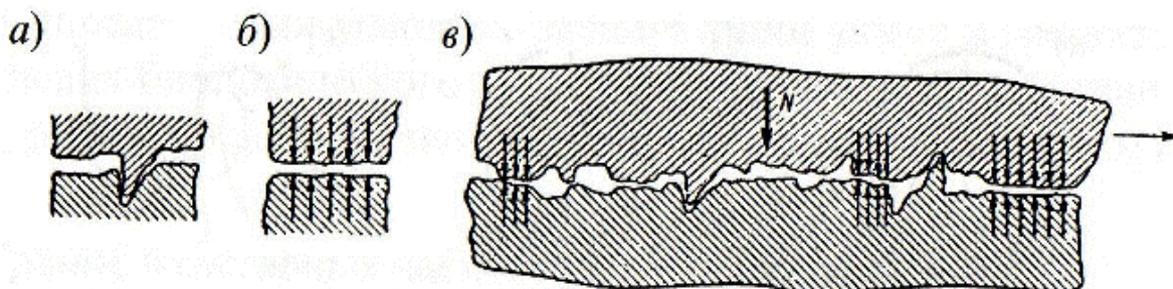


Рисунок 3.4. – Схема взаимодействия трущихся поверхностей а – механическое; б – молекулярное; в – молекулярно-механическое.

микронеровности. Места выступов на одной поверхности отнюдь не совпадают с местами выступов на другой. Цитата основоположника

трибологии Боудена «наложение двух твердых тел одного на другое подобно натяжению швейцарских Альп на перевернутые австрийские Альпы — площадь контакта оказывается очень малой».

Однако при сжатии остроконечные «горные пики» пластически деформируются и подлинная площадь контакта увеличивается пропорционально приложенной нагрузке. Именно сопротивление относительному сдвигу этих контактных зон и является основным источником трения движения. Само сопротивление сдвигу при идеальном контакте определяется межмолекулярным взаимодействием, зависящим от природы контактирующих материалов.

[https://www.youtube.com/watch?v=mJzG7C2xMEg&list=PL-Y315lhDX3FBrm0x\\_fGShfzHkauOa7vH&index=40](https://www.youtube.com/watch?v=mJzG7C2xMEg&list=PL-Y315lhDX3FBrm0x_fGShfzHkauOa7vH&index=40)

Учет сил межмолекулярного взаимодействия можно произвести из следующих соображений. Пусть силы межмолекулярного притяжения оказывают нормальное к поверхности дополнительное давление  $p$  на единицу площади соприкосновения.

Формулу для силы трения можно написать так:

$$F = \mu (N + p S). \quad (3.1)$$

В этой формуле  $\mu$  — коэффициент трения,  $N$  — сила нормального давления, а  $S$  — площадь контакта, при которой тела сближаются настолько близко, что силы межмолекулярного притяжения начинают играть важную роль. Так как такая площадь



Рисунок 3.5. — Зависимость силы трения от высоты неровностей трущихся тел

контакта очень мала (контакт происходит в основном по вершинам неровностей), то второе слагаемое при достаточно шероховатых поверхностях не играет большой роли и поэтому инженеры в своих расчетах пользуются более простой формулой:  $F = \mu N$ . Она читается так: сила трения пропорциональна силе нормального давления.

Коэффициент пропорциональности  $\mu$  называется коэффициентом

трения. И только в том случае, когда степень обработки контактирующих поверхностей станет достаточно высокой, роль сил

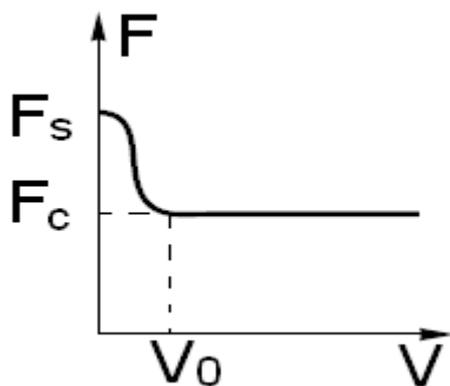


Рисунок 3.5. – Зависимость силы сухого трения от скорости с учетом штрибек –эффекта. Величина скорости  $V_0$  очень мала, не более единиц мм/сек.

межмолекулярного притяжения становится определяющей. Поэтому в технике чистоту (степень выравнивания неровностей) трущихся поверхности ограничивают до оптимального значения. На рисунке 3.5 показано, как изменяется сила трения в зависимости от высоты неровностей  $h$  контактирующих поверхностей. Формулу  $F = \mu N$  обычно применяют для любых тел, так как степень отражения ею реальной действительности весьма высокая. Закон  $F = \mu N$  становится

неверным тогда, когда сила нормального давления или скорость движения велики. В этом случае выделяется слишком много тепла, что сказывается на трении.

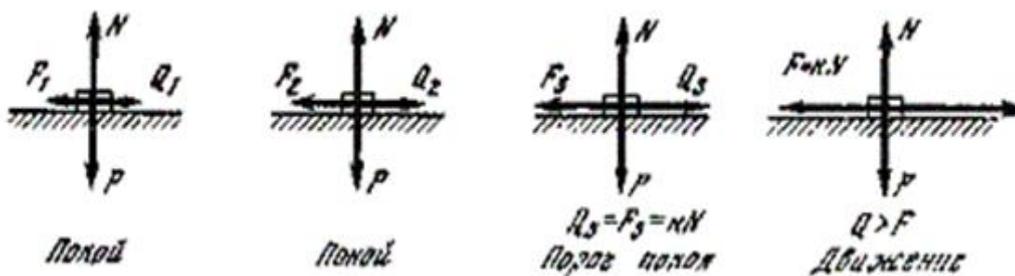


Рисунок 3.6. – К определению порога покоя

Пусть на негладкой поверхности лежит некоторое тело (рисунок 3.6). Его сила тяжести  $P$  уравновешивается нормальной реакцией  $N$ . Мы прикладываем небольшую силу  $Q_1$ , но тело не движется. Это значит, что его держит сила трения  $F_1$ , которая равна силе  $Q_1$ . Увеличим немного силу  $Q_1$  до величины  $Q_2$ . Тело продолжает оставаться в покое. Это говорит о том, что его не пускает сила трения  $F_2$ , равная  $Q_2$ . И так далее. Но силу  $Q$  можно увеличивать беспрестанно, а сила трения не может быть больше своего максимально возможного значения  $F = \mu N$ . Когда  $Q$  становится равной максимальной силе трения, то этот момент называется **порогом покоя** или **порогом срыва**. В следующее

мгновение начинается движение. Следовательно, сила трения изменяется от нуля до некоторого максимального значения, равного  $\mu N$ . Когда нет тянущей силы, нет и силы трения. При наличии движущей силы появляется сила трения.

В начале XX века возникло сомнение в правильности этой картины при очень малых скоростях. В 1902 году Штрибеком установлено, что при отсутствии смазки сила сопротивления не падает с разу с уровня силы трогания до кулоновой силы, а возникает постепенное падение силы с ростом скорости — эффект, противоположный гидродинамической вязкости. Этот факт был многократно перепроверен в дальнейшем и теперь обычно именуется штрибек эффектом. Как было сказано, у большинства трущихся тел зависимость силы трения от скорости незначительна. Однако существуют некоторые материалы у которых эта зависимость существенна и нелинейна. Благодаря этому возникает такое явление как фрикционные колебания о которых речь пойдет позднее.

Сформулируем законы Кулона для трения скольжения.

**Первый закон.** Сила трения скольжения равна сдвигающей силе и заключена между нулем и максимальным значением, которое достигается в момент выхода тела из положения равновесия

$$0 \leq F_{\text{тр}} \leq F_{\text{тр}/\text{max}} \quad (3.1)$$

(условие отсутствия скольжения тела).

**Второй закон.** Максимальная сила трения скольжения при всех прочих условиях не зависит от площади соприкосновения трущихся поверхностей.

Из этого закона следует, что для того, чтобы сдвинуть, например, кирпич, надо приложить одну и ту же силу независимо от того, какой гранью он положен на поверхность – широкой или узкой.

**Третий закон.** Максимальная сила трения скольжения пропорциональна силе нормального давления тела на опорную поверхность

$$F_{\text{тр}/\text{max}} = \mu N \quad (3.2)$$

(условие начала скольжения тела).

$$\bar{N} = -\bar{Q}; N = Q; \quad (3.3)$$

$\bar{N}$  - нормальная реакция опорной поверхности;

$\bar{Q}$  - сила давления тела на эту поверхность.

Безразмерный коэффициент  $\mu$  называют *коэффициентом трения скольжения* или *коэффициентом трения 1-го рода*.

**Четвертый закон.** *Коэффициент трения скольжения зависит от материала и физического состояния трущихся поверхностей (степени шероховатости, влажности, температуры и других условий).*

Коэффициент трения скольжения в зависимости от различных условий устанавливается экспериментально.

Приведем значения коэффициента трения скольжения для некоторых материалов: ):

Сталь по льду . . . . .	0,027
Сталь по стали . . . . .	0,15
Бронза по чугуно . . . . .	0,16
Бронза по железу . . . . .	0,19
Кожаный ремень по чугуно . . . . .	0,28
Дуб по дубу . . . . .	0,54 - 0,62

Приведенные выше данные содержат лишь приближенную оценку коэффициентов трения скольжения и поэтому пригодны лишь для приближенных технических расчетов. В некоторых случаях приходится ставить особые эксперименты для определения более точных значений коэффициентов трения.

***Приведите примеры из собственного опыта, где выполняются законы Кулона – Амантона.***

Коэффициент трения определяют так. Замеряют динамометром силу, необходимую для перемещения одного тела по поверхности другого, и делят полученное значение силы на вес тела. Найденные коэффициенты вносятся в справочники по физике. Если вам для решения той или иной практической задачи понадобится величина коэффициента трения, ее можно взять из таблицы. Нужно только помнить, что приведенные там значения коэффициентов трения приблизительные. Ведь трущиеся поверхности, как правило, загрязнены. На них бывает ржавчина, окислы и другие посторонние включения, что, естественно, влияет на величину трения. Так как степень загрязнения поверхностей при опытно определении коэффициента трения точно неизвестна, то, строго говоря, нам

неизвестно, что же за коэффициент трения мы получили. Скажем, указанный в справочнике коэффициент трения меди по меди на самом деле не коэффициент трения между двумя медными поверхностями, а коэффициент трения между какими-то загрязнениями, имеющимися на меди. Получить значение коэффициента трения для абсолютно чистых поверхностей невозможно. Допустим, мы вычистили и отполировали два медных бруска, удалили с них жир, дегазировали в вакууме и т. д. Если теперь сложить два куса меди вместе, то они слипнутся и образуют один кусок металла — ведь атомы на границе раздела, образно говоря, не могут знать, какому бруску они принадлежат.

Законы Кулона приближенно справедливы при скольжении одного тела по поверхности другого с некоторой относительной скоростью. При этом коэффициент трения зависит от относительной скорости скольжения. Для большинства материалов он уменьшается с увеличением этой скорости. В приближенных технических расчетах обычно считают, что коэффициент трения скольжения не зависит от относительной скорости скольжения тела.

### Трение качения

Если рассматриваемое тело имеет форму цилиндрического катка и под действием активных сил может катиться по поверхности другого тела, то из-за деформации поверхностей этих тел в месте их соприкосновения возникают силы реакции, препятствующие как скольжению, так и качению катка. Трение качения обусловлено тем, что катку приходится все время взбираться на небольшой бугорок, образующийся перед ним. Примерами таких катков являются различные колеса, например, колеса локомотивов, электровозов, вагонов, автомашин и т.д. Чем дорога тверже, тем сопротивление качению меньше. Поэтому автомобильные и мотоциклетные заезды на побитие рекордов скорости проводят обычно по дну высохших соленых озер, которые обладают очень твердой поверхностью. Пусть к оси катка весом  $P$  (рисунок 3.6.), находящегося на горизонтальной плоскости, приложена горизонтальная сила  $Q$ . Соприкосновение катка с плоскостью из-за их деформации происходит не вдоль одной образующей цилиндра, как в случае абсолютно твердых тел, а по некоторой площадке  $BC$ .

Из условия равновесия катка имеем:

$$Q - F_{\text{тр}} = 0; \quad N - P = 0; \quad N\varepsilon - Qr = 0; \quad (3.4)$$

На каток действуют две уравновешенных пары сил ( $Q$  и  $F_{\text{тр}}$ ) и ( $N$  и  $P$ ). Пара ( $Q$  и  $F_{\text{тр}}$ ) стремится привести каток в движение по

часовой стрелке, а пара ( N и P) препятствует этому, действуя против часовой стрелки.

Момент пары ( N и P) называют моментом сопротивления качению. Установлены следующие приближенные законы трения качения.

Первый закон. Максимальный момент пары сил, препятствующий качению, в широких пределах не зависит от радиуса катка.

Второй закон. Максимальный момент сопротивления качению пропорционален силе нормального давления катка на опорную плоскость и достигается в момент выхода катка из положения равновесия:  $M_{\max} = \delta N$ ;  $\delta = \varepsilon_{\max}$  (условие начала качения катка).

Коэффициент  $\delta$  называют коэффициентом трения качения или коэффициентом трения 2-го рода. Он имеет размерность длины.

Коэффициент трения качения равен плечу пары сопротивления качения при предельном равновесии катка.

**Третий закон.** Коэффициент трения качения зависит от материала катка, опорной плоскости, а также от физического состояния их поверхностей.

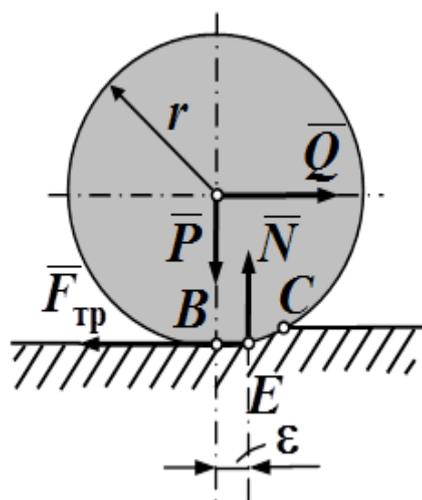


Рисунок.3.6. – Определение сил трения качения

В момент начала качения катка (выхода катка из положения равновесия) имеем ( см. рисунок 3.6.)  $T = T_{\max}$ ;  $\delta = \varepsilon_{\max}$ ;  $N \delta - T_{\max} r = 0$ ; Отсюда для максимальной силы, требующейся для начала качения, получим  $T_{\max} = N \delta / r$ , т.е. сила, требующаяся для движения катящегося тела обратно пропорциональна радиусу тела. По этой причине колеса арбы кочевники делали большого диаметра,

а высокопроходимая техника и внедорожники должны иметь колеса большого диаметра. Коэффициенты трения качения устанавливаются экспериментально.

Приведем значения коэффициентов трения качения для некоторых материалов (в см) Стальной каток по стали 0,005; Деревянный каток по стали 0,03 – 0,04;

Деревянный каток по дереву . 05 – 0,08;

Колесо вагона по рельсу  $\approx 0,05$

Резиновая шина по шоссе.  $\approx 0,024$

Коэффициент трения качения при качении можно считать не зависящим от угловой скорости качения катка и его скорости скольжения по плоскости.

Законы трения качения, как и законы трения скольжения, справедливы для не очень больших давлений и не слишком легко деформируемых материалов катка и плоскости.

Сравним силу тяги  $T_{\max}$ , необходимую для начала скольжения тела и для начала качения катка радиуса  $r$  одинакового веса  $P$  по горизонтальной плоскости

Получим:

Для скольжения -  $T_{\max} = \mu P$ ; Для качения -  $T_{\max} = P \delta / r$  ;

Обычно  $\mu \gg \delta / r$ . Следовательно, для начала качения требуется значительно меньшая сила, чем для начала скольжения тела одинакового веса по горизонтальной плоскости. С точки зрения затрат энергии выгодно заменять скольжение качением. Изобретение колеса примерно 5000 лет назад явилось огромным достижением человечества

по пути борьбы с трением (<http://www.teoretmech.ru/film6.htm>).

Пусть твердое тело под действием активных сил находится на шероховатой поверхности в предельном состоянии равновесия, когда

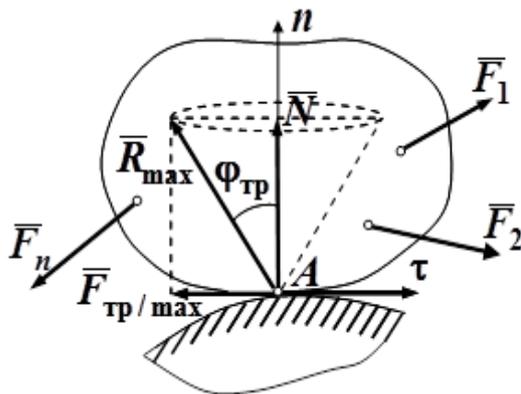


Рисунок 3.7.– Определение конуса трения

сила трения достигает своего максимального значения

$F_{\text{тр}} = F_{\text{тр}/\text{max}}$  при данном

значении реакции (Рисунок.).

В этом случае полная реакция шероховатой

поверхности отклонена от нормали общей касательной

плоскости трущихся поверхностей на наибольший

угол  $\Phi = \Phi_{\text{тр}}$ .

Угол между полной реакцией, построенной на

наибольшей силе трения при данной нормальной реакции, и направлением нормальной реакции, называется **углом трения**

$$\Phi_{\text{тр}} = (\bar{R}_{\text{max}}, \bar{N}); \bar{R}_{\text{max}} = \bar{F}_{\text{тр}/\text{max}} + \bar{N}. \quad (3.5)$$

Из рисунка следует

$$\operatorname{tg} \varphi_{\text{тр}} = \frac{F_{\text{тр}/\max}}{N} = f ; F_{\text{тр}/\max} = f N . \quad (3.6)$$

Тангенс угла трения равен коэффициенту трения

$$\operatorname{tg} \varphi_{\text{тр}} = f . \quad (3.7)$$

Конус с вершиной в точке приложения нормальной реакции шероховатой поверхности, образующая которого составляет угол трения с этой нормальной реакцией, называется **конусом трения**.

<https://ppt-online.org/694905><https://ppt-online.org/694905>

Все максимальные реакции шероховатой поверхности направлены вдоль образующих конуса трения.

Если коэффициент трения во всех направлениях одинаков, то конус трения круговой.

*Конус трения интересен тем, что ограниченная им область определяет область равновесия тела.* Если линия действия равнодействующей активных сил проходит внутри конуса трения, то эта сила не сдвигает тело, как бы она не была велика. Если же линия действия равнодействующей активных сил расположена вне конуса трения, то эта сила сдвинет тело, как бы мала она не была. Давайте посмотрим, почему так происходит.

Если сила  $Q$  действует внутри конуса трения, то сдвигающая сила  $Q_1 = Q \sin \alpha$ , (рисунок 3.7.).

Вычислим силу трения:

$$F = kN = kQ \cos \alpha = Q \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi \quad (3.8)$$

Система не придет в движение до тех пор, пока составляющая действующей силы  $Q_1$  не превысит или хотя бы станет равной силе трения, удерживающей в покое одно тело на поверхности другого. Поскольку  $Q_1 = Q \sin \alpha$ , запас прочности:

$$F - Q_1 = Q (\cos \alpha \operatorname{tg} \varphi - \sin \alpha) = Q \sin (\varphi - \alpha) / \cos \varphi . \quad (3.9)$$

Видно, что при любых углах  $\alpha < \varphi$  выражение положительно, а это значит, что сдвигающая сила меньше силы трения и тело не придет в движение при любых значениях действующей внутри конуса трения силы  $Q$ . При  $\alpha = \varphi$  эти силы равны друг другу и наступает состояние неустойчивого равновесия, а при  $\alpha > \varphi$  правая часть уравнения становится отрицательной, что говорит о том, что  $Q_1 > F$ . Это неравенство достигается при любом значении силы  $Q$ .

**Приведите примеры неосознанного или сознательного учета конуса трения.**

Конус трения построить очень просто. Пусть, например, нам надо построить конус трения для стального стержня, опирающегося на чугунную плиту. Смотрим в справочник и находим коэффициент трения для стали по чугуну. Он равен 0,16. Следовательно, надо построить конус, в котором образующая была бы наклонена к нормали под углом  $9^\circ$ , так как тангенс  $9^\circ$  примерно равен 0,16 ( $\sin 9^\circ = 0,1584$ ). Понятно, что чем больше коэффициент трения, тем больше угол в конусе трения и наоборот. Уметь строить конус трения нужно вот почему.

Однажды в Мюнхене рухнул мост, и виноват в этом был не ураганный ветер, а... конус трения. Этот мост одним своим концом был закреплен при помощи шарнира, а другим — положен на катки. Мост всегда крепят таким образом, чтобы он не провиснул при колебаниях температуры. Шарнир был заполнен пастой, предохранявшей его от коррозии. В жаркий летний день паста растопилась, и вязкость ее стала меньше. Характер трения изменился - оно также уменьшилось. Конус трения сузился, и сила давления на опору вышла за пределы конуса. Равновесие нарушилось, и мост рухнул (рисунок 3.8.).

Инженерам часто приходится строить конус трения, чтобы определить, будет ли находиться в равновесии данная конструкция или нет.

В инженерной практике составляющие машину детали скрепляются друг с другом различными способами. Наиболее широко применяется так называемое разъемное соединение, когда детали скрепляются друг с другом болтами или шпильками с гайками. В них соединение осуществляется посредством резьбы.

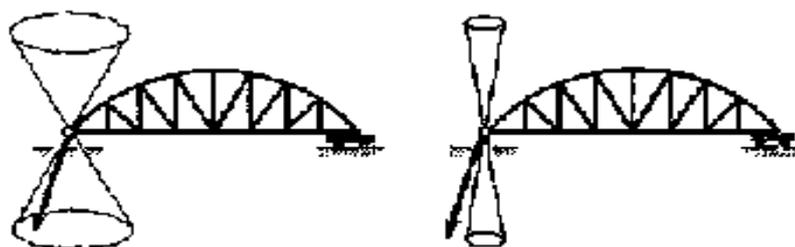


Рисунок.3.8. разрушение моста из-за выхода сил из конуса трения

Резьбы чрезвычайно широко используются в машиностроении и разделяются на резьбы крепежные и резьбы силовые. Крепежные резьбы служат для скрепления деталей в разъемных соединениях, а силовые резьбы служат для передачи усилий.

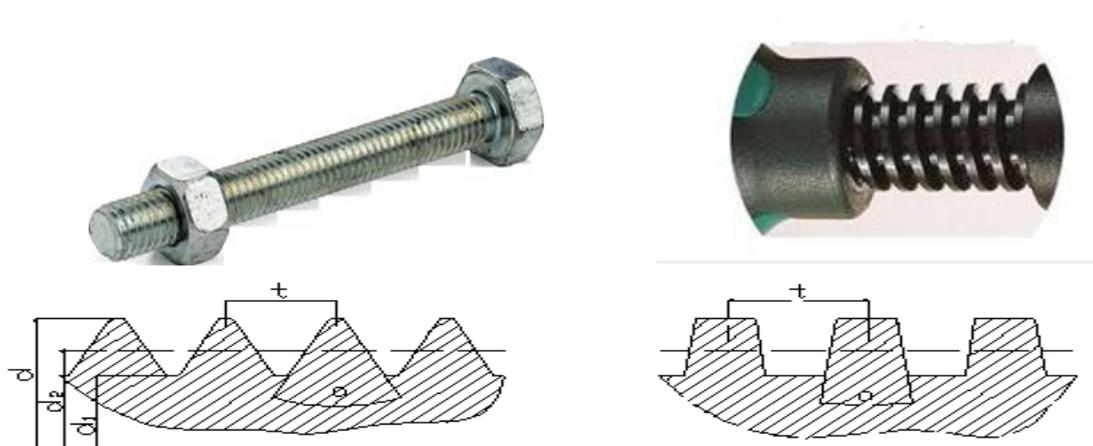


Рисунок.3.9.– Крепежная (слева) и силовая (справа) резьбы и их профили

Применение крепежных резьб на болтах и гайках показано на рисунке 3.10. Практически в каждом техническом изделии, независимо от его сложности, используются резьбовые соединения.

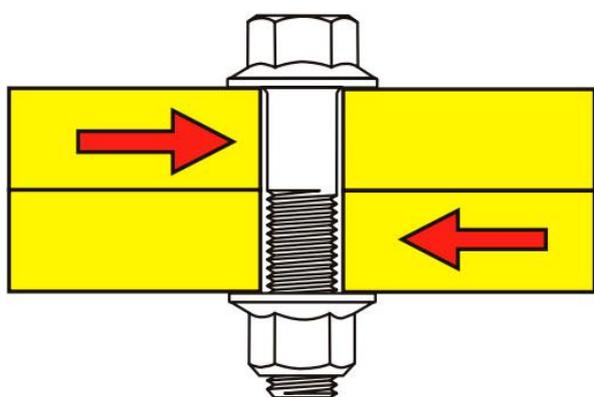


Рисунок 3.10. – Пример скрепления двух деталей болтом с гайкой. Стрелками показаны типичное направления действия сил в соединении

Основным преимуществом резьбовых крепежных элементов по сравнению с большинством других состоит в том, что такое соединение можно многократно разбирать и использовать повторно. Тем не менее, оно может стать источником проблем, вызванных самопроизвольным ослаблением. Силовые резьбы применяются для тех

винтовых соединений, в которых желательно иметь меньшие потери на трение

(например, в домкратах, натяжных устройствах, подъемниках, винтовых прессах, ходовых винтах).

<https://www.youtube.com/watch?v=MqATDh5RMu0>

Известно, что винтовая резьба представляет собой разновидность наклонной плоскости.

Рассмотрим равновесие гайки на витке резьбы. От сползания по наклонной плоскости гайку удерживает сила трения  $F_{тр}$ , которая зависит от материала винта и гайки и силы нормального давления  $N$ . Равнодействующая этих сил  $R$  образует угол трения.

Рассмотрим силы, действующие в винтовой паре с прямоугольной резьбой (рисунок 3.11). При завинчивании гайка, равномерно вращаясь под действием окружной силы, приложенной

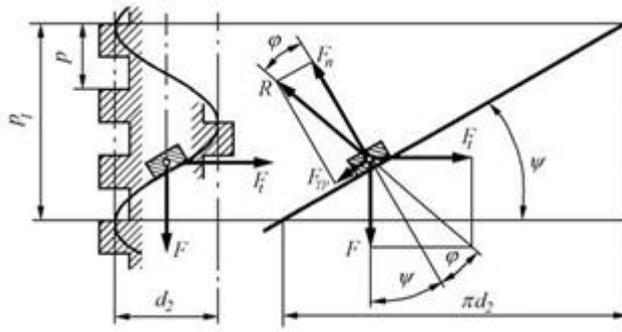


Рисунок 3.11. – Силы в винтовой паре

по касательной к окружности среднего диаметра  $d_2$  резьбы, перемещается вдоль оси винта под действием осевой силы  $F$ . Развернем виток резьбы в наклонную плоскость, а гайку представим в виде ползуна. При равномерном

перемещении по наклонной плоскости ползун находится в равновесии под действием системы сил  $F$ ,  $F_{тр}$ , и  $F_n$ , из которых  $F_n$  – нормальная реакция наклонной плоскости,  $F_{тр}$  – сила трения. Результирующая сила  $R$  отклонена от силы на угол трения  $\varphi$ . Угол трения образует в пространстве конус трения с углом при вершине конуса равным  $2\varphi$ . Из схемы сил следует, что осевая сила  $F$  действует под углом  $\psi$ , который равен углу подъема резьбы. Из рисунка видно что сила  $F$  действует вне конуса трения и поэтому



Рисунок 3.12. – Устройства для предотвращения самоотвинчивания. Пружинная шайба, корончатая гайка и гайка с пластмассовой вставкой

такое соединение неустойчиво. При действии переменных сил гайка начнет скользить по винту, что называется самоотвинчиванием. Но показанная на рисунке резьба является силовой и поэтому это не опасно. Например, известно, что при пилении зажатой в тисы детали крепление ослабляется, что заставляет время от времени подтягивать винт тисов.

Из рисунка видно, что чем меньше  $\psi$  – угол подъема резьбы, и чем больше угол трения  $\varphi$ , тем устойчивее будет это соединение, потому, что действующая сила будет располагаться внутри конуса трения. Самоторможение в винтовой паре проявляется в том, что статическая осевая нагрузка не вызывает самоотвинчивания гайки.

Это условие выражается неравенством  $\psi < \varphi'$ . Все крепежные резьбы выполняют самотормозящими.

Из этого же рисунка видно, что условие самоторможения будет лучше выполняться для резьбы с малым углом наклона и когда между гайкой и винтом существует достаточно большая сила трения. Как известно сила трения зависит от коэффициента трения и силы нормального давления. Простейшим способом повышения силы трения является применение пружинной шайбы, иногда называемой по имени изобретателя шайбой Гровера или просто гровером (рисунок 3.12.). Данная шайба имеет вид одного витка мощной пружины с зазором. Наклон витка и зазор находятся в направлении, противоположном вращению гайки, что и препятствует отвинчиванию. При завинчивании гайки вращение идет беспрепятственно, а вращению в противоположном направлении препятствует кромка шайбы Гровера, которая как бы впивается в металл, увеличивая силу трения и обеспечивая стопорение гайки.

Другой способ – использование корончатой гайки. Зубцы короны так же впиваются в металл сильно увеличивая силу трения и, тем самым увеличивая угол конуса трения.

В настоящее время широко используются самоконтрящиеся гайки. Как правило, действие самоконтрящихся гаек основано на принципе фрикционного стопорения, т. е. создания повышенного трения в витках резьбы. Наиболее совершенны гайки, у которых повышенное трение создается только в конце затяжки.

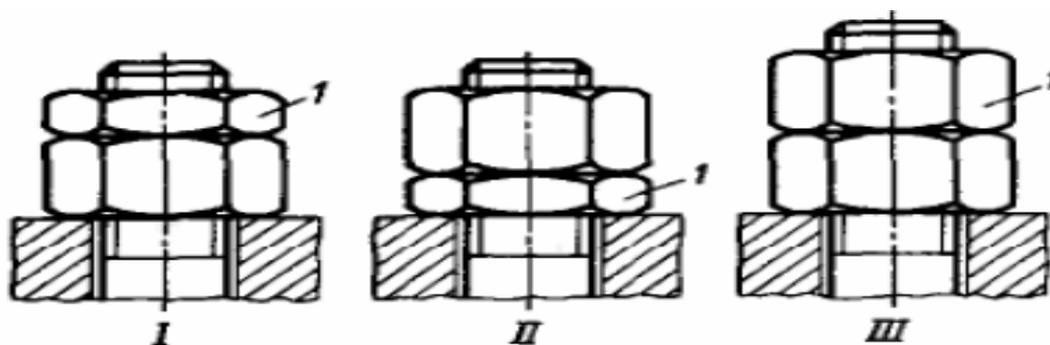


Рисунок 3.13. – Стопорение разъемного соединения контрагайкой (1)

Основа стопорения самоконтрящимися гайками — создание гарантированного натяга и увеличение трения в резьбовой паре за счет деформирования резьбовой части гайки или использования безрезьбовых упругих вкладышей. Типовая самоконтрящаяся гайка представляет собой обычную шестигранную или другую гайку с тонкостенным резьбовым цилиндрическим участком на неопорном торце — бонкой, куда вставлена оправка из нейлона. При

завертывании гайки нарезной стержень болта нарезает резьбу во вставке; упругость вставки тормозит гайку и при повторных завертываниях..

Контргайка — конtringий элемент, вторая гайка, навинчивающаяся за основной гайкой, чтобы предотвратить развинчивание резьбового соединения. Зачастую выполняется более тонкой, чем основная гайка (2/3 толщины).  
[https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=27&v=0gSLyESDoI&feature=emb\\_logo](https://www.youtube.com/watch?time_continue=27&v=0gSLyESDoI&feature=emb_logo)

При затяжке соединения сначала затягивается одна гайка (обычно контргайка), затем вторая (первая при этом удерживается ключом). Создающееся при затягивании второй гайки напряжение в резьбе предотвращает развинчивание соединения.  
<https://www.youtube.com/watch?v=Mcm4hLwVZ-Q>

***Физические процессы, происходящие в таких креплениях нужно рассмотреть самостоятельно.***

Покажем еще один поучительный пример использования конуса трения. В месте крепления сидения табурета к ножкам А развивались бы значительные усилия, не будь силы трения ножек и пол. Сила трения будет этому способствовать до тех пор, пока ножка

будет находиться внутри конуса трения и именно конус трения позволяет нам раскачиваться на двух ножках. Точно так же конус трения помогает удерживать в одном месте акватории корабль, бросивший якорь.

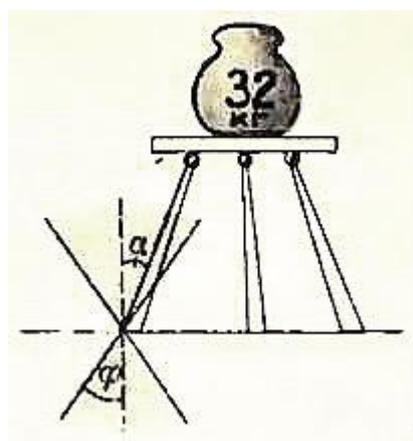


Рисунок 3.14. – Роль конуса трения

***Нарисуйте схему якорной стоянки и объясните действие сил.***

Чтобы пробраться к выходу в переполненном автобусе приходится извиваться во все стороны. Делаем мы это бессознательно, не задумываясь, что таким образом мы выходим из конусов трения в местах касания с другими пассажирами.

Рассмотрим еще один практический пример, связанный с трением.

Под каким углом выгоднее всего тянуть веревку, чтобы перемещать тяжелый груз  $P$  по горизонтальной плоскости?

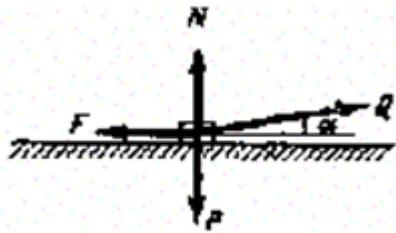


Рисунок.3.15– К  
выбору угла приложения  
силы

Спроектируем все силы, действующие на груз  $P$  (рисунок 3.15), на горизонтальное и вертикальное направления. Получим два уравнения:

$$Q \cos \alpha - \mu N = 0 \quad (3.10)$$

$$\text{и } Q \sin \alpha + N - P = 0, \quad (3.11)$$

из которых найдем силу  $Q$  :

$$Q = P \sin \varphi / \cos (\alpha - \varphi). \quad (3.12)$$

Мы видим, что  $Q$  минимальна, если  $\alpha = \varphi$ , т. е. выгоднее всего тянуть под углом, равным углу трения. Чем плоскость более гладкая, тем более длинную веревку надо брать.

Трение используется при торможении транспортных средств, например, автомобиля на шоссе. Благодаря трению происходит удержание и фиксация предметов. Так работает крепеж деталей с помощью гвоздей, шурупов, винтов и болтов; расклинивание деталей, удержание в скале альпинистских крючьев, анкерных болтов и пробок в стене и т.д. Трение является единственной силой способной превращать механическую энергию во внутреннюю (тепловую). Это используется в технике для сварки трением

([https://ochepyatki.ru/view\\_video.php?viewkey=fc51f56](https://ochepyatki.ru/view_video.php?viewkey=fc51f56)) Детали прижимают друг к другу и вращают, расплавляя заготовку теплом, выделяющимся в процессе трения. Обычно сталь упрочняют закалкой, а можно упрочнять трением, возникающим при резании, - ведь при трении режущего инструмента о вращающуюся заготовку ее поверхность и нагревается и уплотняется. Специальный инструмент - стальной диск (вращающийся резец), режущая кромка которого переходит в калибрующую часть, параллельную обрабатываемой поверхности. При трении широкой калибрующей части о поверхность заготовки происходит упрочнение.

### Формула Эйлера

Представим, что вы поднимаете некоторый груз при помощи веревки, переброшенной через горизонтально расположенное бревно  $r$  (рисунок 3.16.). Если бы трение отсутствовало, то, поднимая груз, пришлось бы прикладывать силу, в точности равную весу груза. Но

так как между веревкой и бревном существует трение, то, чтобы поднять груз  $F_2$ , придется приложить силу  $F_1 > F_2$ , ведь приходится преодолевать вес груза и силу трения веревки о поверхность бревна. Поскольку, как мы показали выше, сила трения качения меньше силы трения скольжения, то на практике бревно заменяют

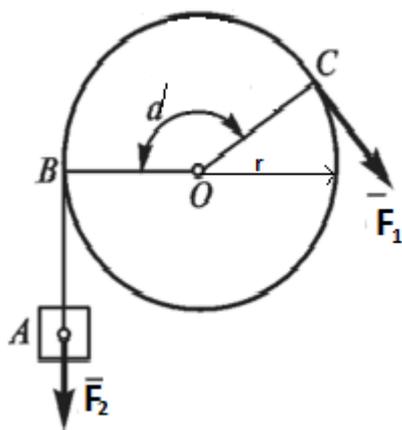


Рисунок 3.16. – К уравнению Эйлера

появление равной ей по величине и противоположной по направлению силы, приложенной к бревну. Эта сила стремится заставить вращаться бревно вокруг некоторой оси, как в неподвижном блоке. Сила  $F_1$ , необходимая для поднятия груза  $F_2$ , вычисляется по формуле Эйлера:

$$F_1 = F_2 e^{\mu \alpha}$$

(3.14)

Здесь  $e$  — основание натуральных логарифмов,  $\mu$  — коэффициент трения, а  $\alpha$  — угол охвата блока веревкой, выраженной в радианах (угол  $\text{BOC}$ ). Заметим, что сила не зависит от радиуса бревна. Например, пусть требуется удержать поднятый каким – либо механизмом груз весом в 10 тонн. Вместо бревна будем удерживать груз на канате, перекинутом через железную трубу. Коэффициент трения каната о железную трубу известен. Он равен 0,35.

Предположим, что мы обернули канат вокруг трубы три раза. Тогда угол охвата тумбы канатом  $\alpha = 3 \cdot 2\pi = 6\pi$ . Подставив значения  $F_2$ ,  $\mu$ ; и  $\alpha$  в формулу Эйлера, получим уравнение  $10000 = F_1 \cdot 2,72 \cdot 0,35^{6\pi}$ , из которого найдем силу  $F_1$ . Она равняется примерно 15 кг. Следовательно, чтобы удержать на весу груз в 10 тонн, мы должны удерживать канат всего с силой в 15 кг. Остальные 9985 кг гасятся силой трения. С этой работой справится и подросток.

Значительную величину силы трения каната, обернутого вокруг круглого предмета широко применяют при швартовке кораблей, когда кинетическая энергия движущегося корабля за счет

указанной силы трения превращается в тепло. Раньше, когда причальные тумбы делались из дерева, они, нагреваясь, иногда даже начинали дымиться. По этой причине сплавщики называли причальные тумбы огнивами. Чтобы во время швартовки огнива не загорались, их обливали холодной водой.

<https://www.youtube.com/watch?v=os8FhVdzkLc>

Каждый из нас по крайней мере раз в день пользуется формулой Эйлера. Происходит это тогда, когда мы завязываем шнурки на ботинках. Ведь что такое узел, как не веревка, обвитая вокруг другой части той же веревки? И крепость узла тем больше, чем больше изгибов делает шнурок в узле.

Значительные силы трения, развиваемые в месте многократного охвата тросом блока или шкива применяют в технике для передачи вращательного момента при помощи тросовых и ременных передач.

***Покажите, что передаваемый момент будет зависеть от угла охвата.***

Полезно или вредно трение?

Смотрим видео:

[https://www.youtube.com/watch?v=z85oN5MiN9c&list=PL-Y315lhDX3FBrm0x\\_fGShfzHkauOa7vH&index=46](https://www.youtube.com/watch?v=z85oN5MiN9c&list=PL-Y315lhDX3FBrm0x_fGShfzHkauOa7vH&index=46)

Многие, не задумываясь, отвечают: «Конечно, вредно!» Но ведь, если бы не было трения, мы не могли бы ходить по земле (вспомните, как скользят ноги на льду), нельзя было бы ездить на велосипеде, автомобиле, мотоцикле (колеса вертели бы на месте), нам нечего было бы носить (нитки в ткани держатся силами трения). Если не было бы трения, вся мебель в комнате сбилась бы в один угол, тарелки, стаканы и блюда соскальзывали бы со стола, гвозди и шурупы не держались бы в стене, ни одной вещи нельзя было бы удержать в руках и т. д. и т. п.

Перечень подобных «ужасов» можно продолжать до бесконечности, но и так ясно, что трение — явление отнюдь не вредное. Оно вредно только в машинах, и инженеры борются там с ним, применяя шарикоподшипники, смазку и т. п.

К этому можно добавить, что, если бы не было трения, неизвестно, как пошло бы развитие цивилизации на Земле — ведь наши предки добывали огонь трением.

Сила трения, действующая вдоль поверхности соприкосновения твердых тел, направлена против скольжения тела. В сельскохозяйственной практике на различии значений коэффициента трения у семян разных зерновых культур основано разделение смеси этих семян на составные части. Смесь зерен, например, овса и проса, медленно высыпается из бункера на движущуюся бесконечную ленту, расположенную под углом к горизонту. Угол наклона ленты

подбирается так, чтобы зерна овса удерживались на ней силой трения увлекались вверх, а зерна проса, у которых коэффициент трения с материалом ленты меньше, чем у зерен овса, скользили по ленте вниз. В результате зерна овса и проса ссыпается с разных сторон «ленточного сепаратора».

Но не надо думать, что трение всегда препятствует движению – часто оно ему способствует. При прокручивание колес автомобиля сила трения о поверхность Земли, препятствует их проскальзыванию и действует со стороны дороги в сторону, противоположную проскальзыванию, т.е. вперед, обеспечивая поступательное движение автомобиля. Чем сильнее трение, тем больше соответствующая сила, поэтому его стараются не уменьшать, а увеличивать: покрытие дороги делают шероховатым, наносят на поверхность шины рельефные рисунки (протекторы)

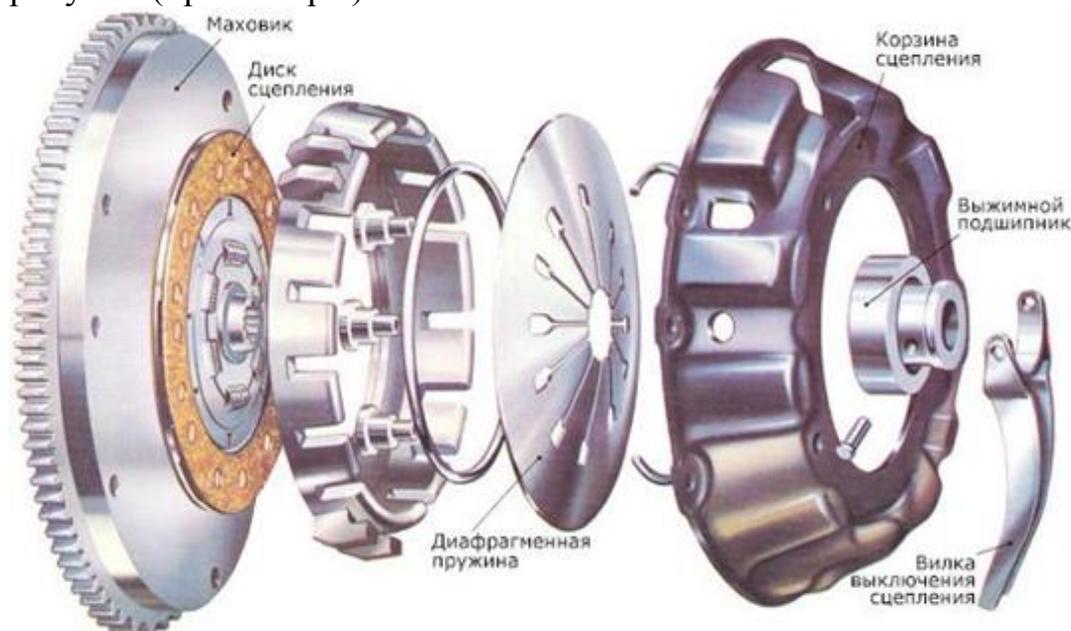


Рисунок 3.17. – Муфта сцепления современного автомобиля

Поскольку сила трения зависит в большой степени от силы нормального давления, то это широко применяется в технике для плавного включения и выключения передаваемой от двигателя к исполнительному механизму силы. Такие устройства называются фрикционными муфтами.

Сцепная фрикционная муфта (муфта сцепления) предназначена для разъединения и плавного соединения входного и выходного валов посредством трения.

Во время включения в работу сцепных фрикционных муфт крутящий момент на ведомом валу возрастает поступательно и пропорционально увеличению силы взаимного прижатия поверхностей трения. Это позволяет соединять валы под нагрузкой и

со значительной начальной разницей их угловых скоростей. В процессе включения муфта пробуксовывает, а разгон ведомого вала осуществляется плавно, без ударов.

Предохранительная муфта предназначена для разобщения входного и выходного валов в случае превышения предельной величины крутящего момента.

Работа сухого однодискового фрикционного сцепления (рисунок 3.17) очень проста и сводится к следующему. Сцепление постоянно включено — это обеспечивается диафрагменной пружиной (или рядом пружин), которая прижимает нажимной диск к ведомому диску и к маховику. В таком положении весь узел сцепления вращается как единое целое, и крутящий момент полностью передается на коробку передач.

[https://www.youtube.com/watch?v=sVF7Qf-U3Nw&feature=emb\\_logo](https://www.youtube.com/watch?v=sVF7Qf-U3Nw&feature=emb_logo)

При переключении передач сцепление выключается: при нажатии на педаль пружина сжимается (с помощью привода сцепления, нажимной вилки, муфты и выжимного подшипника), ее пластины, закрепленные в «корзине», действуют как рычаги, и отводят нажимной диск от ведомого диска. В этот момент передача крутящего момента от двигателя коробке прекращается и можно переключить передачу. <https://www.youtube.com/watch?v=BgZaz5b4JRk>

После включения нужной передачи педаль сцепления отпускается, пружина возвращается в исходное положение, прижимая нажимной диск к ведущему диску и к маховику — передача крутящего момента возобновляется.

Однако главное преимущество и все возможности сцепления проявляются в момент начала движения автомобиля. Сцепление устроено таким образом, что диски могут прижиматься друг к другу с различным усилием, а поэтому передача крутящего момента может производиться в такой степени, в которой это необходимо. Если слегка отпустить педаль сцепления, то диски будут прижаты друг к другу слабо и проскальзывать, соответственно, и крутящий момент будет передаваться на коробку и колесам не полностью — так становится возможным трогание с места и плавный разгон автомобиля.

#### Тема 4 Явление застоя в технике. Влияние явления застоя на чувствительность приборов. Физика движения транспортных средств. Сила тяги и сцепной вес. Работа тормозов. Занос транспорта.

Наличие трения покоя приводит к тому, что во всех случаях, где действующие силы должны вызвать скольжение соприкасающихся поверхностей, нужны конечные силы для того, чтобы вызвать движение. Если на одно из соприкасающихся тел действует внешняя сила  $F$ , меньшая максимального значения силы трения покоя  $F < (F_{\text{тр покоя}})_{\text{макс}}$ , то тела не проскальзывают относительно друг друга. Это явление называемое "явлением застоя", используется в технике для передачи усилий от одних частей машины к другим (ременные передачи, ленточные транспортеры и др.), при скреплении деталей гвоздями и т.п. "Явление застоя" ставит предел чувствительности измерительных приборов, в которых перемещение указателя связано с возникновением скольжения. Это обстоятельство играет важную роль в ряде случаев, например, в различных измерительных приборах. Большинство измерительных приборов, не только механических, но и электрических, основано на измерении смещений стрелки или другого указателя под действием тех или иных сил. Измеряя смещения указателя, мы определяем силы, вызывающие это смещение, и по ним судим об измеряемой величине (давлении, ускорении, силе тока и т. д.). Но движение указателя в обычных технических приборах почти всегда связано с возникновением скольжения. Ось стрелки прибора обычно укрепляется в подшипниках и вращение стрелки связано со

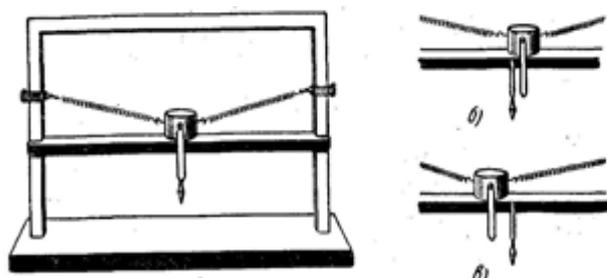


Рисунок 4.1. – Установка для демонстрации явления застоя.

скольжением оси в подшипнике.

[http://aislepkov.phys.msu.ru/?page\\_id=113](http://aislepkov.phys.msu.ru/?page_id=113) Движение стрелки может начаться только после того, как действующая на стрелу сила (которую мы и хотим измерить) достигнет некоторого конечного значения, превосходящего максимальную силу трения покоя в подшипниках.

Вследствие того, что сила трения покоя принимает любые значения равные внешней силе наступить этот момент может в любом положении относительного движения скользящих тел. Явление застоя сказывается не только на чувствительности прибора, но и на точности его показаний. Если бы трение покоя отсутствовало, то стрелка всякий раз устанавливалась бы в таком положении, где

внешняя (измеряемая) сила и упругая сила, возвращающая стрелку к положению равновесия становились бы равными друг другу. Но сила трения покоя может принимать любые значения в достаточно широком интервале, поэтому стрелка может остановиться не точно в этом положении, а лишь вблизи него. Не только в на чале, но и в любой точке шкалы существует область застоя. Прибор дает показания с некоторой ошибкой, которая может быть тем больше, чем больше область застоя. Для демонстрации явления застоя может служить следующая модель (рисунок 4.1). На горизонтальной планке лежит груз, к которому с двух сторон прикреплены пружины. Трение груза о подставку вызывает явление застоя. Если отвести груз от положения равновесия, например, вправо, и предоставить его самому себе, то он начнет двигаться к положению равновесия, но остановится, вообще говоря, не точно в положении равновесия, а в какой-то точке в области застоя, либо не дойдя до положения равновесия (рисунок 4.1 б), либо перейдя его (рисунок 4.1 в). Это зависит от начального отклонения груза, которое определяет скорость груза на границе области застоя.

***Приведите примеры подобного поведения тел.***

Явление застоя, характерное для приборов, в которых движение указателя связано со скольжением, отсутствует в приборах, в которых не возникает скольжения, например в приборах на подвесе. В подвесных приборах подвижная система укрепляется на тонкой и длинной (и потому очень легко закручивающейся) нити. Так как силы сухого трения в этом случае отсутствуют, то подвижная система начинает перемещаться под действием сколь угодно малой силы и в конце концов останавливается в таком положении, в котором измеряемая сила точно равна упругой силе, действующей на подвижную систему; Поэтому в подвесных приборах увеличение точности отсчета положения подвижной системы (при помощи зеркального отсчета или микроскопа) позволяет достичь значительного увеличения чувствительности и точности прибора. Конечно, и в подвесных приборах действуют силы трения и сопротивление среды (или электромагнитные силы, подобные силам трения), но это всегда силы, относящиеся к типу жидкого трения. Они влияют лишь на скорость движения подвижной системы, но не могут вызвать застоя подвижной системы.

Явление застоя играет важную роль не только в измерительных приборах, но и везде, где сила трения проявляется при движении тел. Например в транспортных средствах.

При движении автомобиля на него действует большое количество сил. Рассмотрим силы, действующие на транспортное средство в различных условиях.

Источником силы является двигатель автомобиля, паровой, бензиновый, электрический. Он развивает определенную мощность – силу, помноженную на скорость и крутящий момент. Эта сила посредством системы передачи прикладывается к колесам, которые называются ведущими.

Ведущими называются колеса, соединённые с силовой установкой, а ведомыми — колеса, не имеющими привода, а движущиеся за ведущими. Управляемые колеса, которые могут под воздействием рулевого привода поворачиваться в вертикальной плоскости относительно моста, вследствие чего изменяется направление движения машины. Если вспомнить про крутящий момент, то колесо, к которому крутящий момент подводится извне, называется ведущим, а колесо, с которого момент снимается — ведомым.

В зависимости от того, на какие колеса передается крутящий момент от двигателя, автомобили делятся на заднеприводные, переднеприводные и полноприводные.

Заднеприводные (рисунок 4.2) — это автомобили, у которых крутящий момент от двигателя передается на задние колеса. Задние колеса у них являются ведущими, и именно они, отталкиваясь от покрытия дороги, двигают перед собой весь автомобиль. Передние колеса у автомобилей такого типа являются лишь направляющими (ведомыми) и служат для изменения направления движения. Можно сразу отметить, что заднеприводным автомобилям труднее сохранять прямолинейное движение на скользкой дороге, по сравнению с переднеприводными.

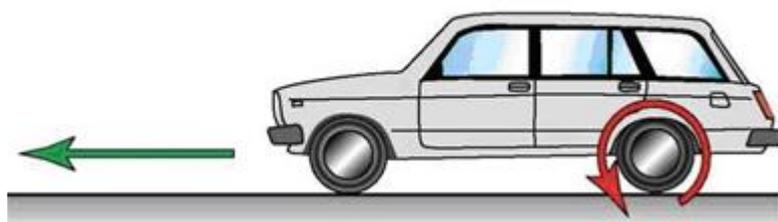


Рисунок 4.2. – Заднеприводный автомобиль

Переднеприводные (рисунок 4.3) — автомобили, у которых крутящий момент от двигателя передается на

передние колеса. У этих автомобилей передние колеса являются как ведущими, так и управляемыми. Задние колеса таких автомобилей не выполняют никакой функции (кроме связи кузова с дорогой), они просто катятся по дороге. А передние колеса работают — получают энергию от двигателя, вращаются и «тянут» за собой всю машину, направляя ее при этом по выбранной водителем траектории.

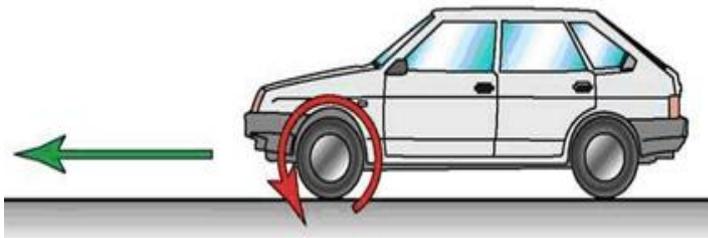


Рисунок. 4.3. – Переднеприводный автомобиль

двигателя осуществляется одновременно на задние и передние колеса.

У «вездеходов» все четыре колеса получают крутящий момент от двигателя, одновременно «тянут» и «толкают» автомобиль,

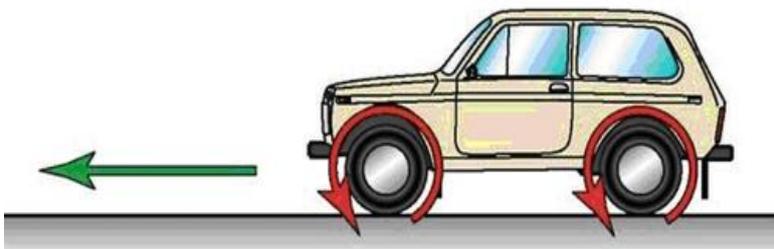


Рисунок 4.4. – Полноприводный автомобиль

максимально повышая его ходовые качества. Этот тип привода идеален для сохранения управляемости даже на скользкой дороге. Энергия от мотора к ведущим колесам передается через трансмиссию: сцепление, коробку передач, карданную передачу, главную передачу, дифференциал и полуоси. Благодаря наличию в трансмиссии коробки передач и главной передачи, суммарный крутящий момент  $M_{кр}$  на ведущих колесах автомобиля больше момента мотора  $M_{дв}$ .

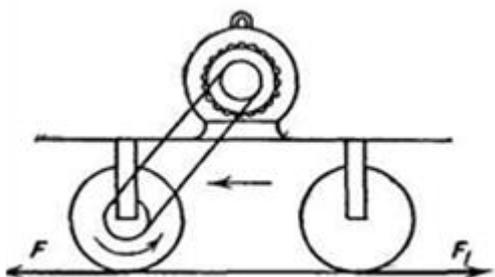


Рисунок 4.5. – Модель ТС с электродвигателем

Все внутренние силы, возникающие в двигателе, не могут быть причиной изменения импульса внутренних сил не могут изменять момента импульса, который определяется моментом импульса колес, поскольку само транспортное средство (ТС) не вращается. Поэтому тип двигателя не играет существенной роли.

Рассмотрение движения ТС сводится к определению тех *внешних* сил, под действием которых изменяется его импульс и его момент импульса.

Рассмотрим детально, как это происходит. Для конкретности будем рассматривать транспортное средство с электрическим мотором, схематическая модель которого приведена на рисунке 4.5.

## Полноприводные

(рисунок 4.4) — это автомобили, у которых передача крутящего момента от

двигателя осуществляется одновременно на задние и передние колеса.

Электромотор, помещенный на раме, соединен ременным приводом с одной парой колес, которые называются ведущими.

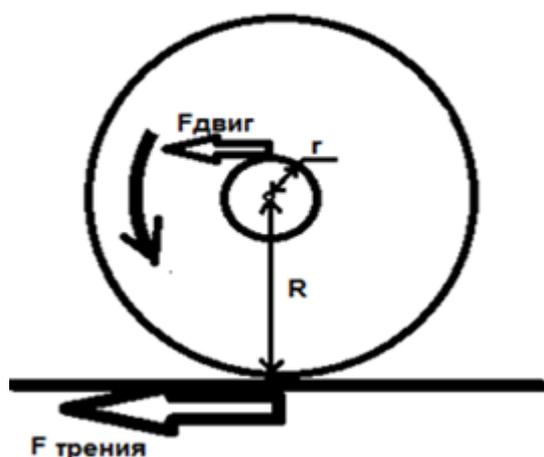


Рисунок 4.6. – Ведущее колесо ТС

Рассмотрим силы, приложенные к ведущим колесам, схема которого показана на рисунке 4.6. Радиус оси колеса, жестко скрепленной с самим колесом, равен  $r$ , а радиус самого колеса равен  $R$ . Сила, приложенная к оси колеса, которая передается при помощи ременного привода от двигателя обозначим как  $F_{\text{двиг}}$ . При включении мотора возникают силы, которые должны вызвать вращение ведущих колес. Но

если бы колеса начали вращаться, а ТС оставалось неподвижным, то должно было бы возникнуть скольжение ведущих колес по земле. Поэтому возникает сила трения покоя между колесами и землей. Эта сила, как всегда, направлена в сторону, противоположную той, в которую должно было бы возникнуть скольжение. При вращении мотора против часовой стрелки скольжение колес по земле в нашем случае должно было бы происходить вправо и, следовательно, сила трения направлена влево. Эта внешняя сила  $F_{\text{трения}}$  и будет сообщать ТС ускорение  $a = F/m$  ( $m$  — масса ТС,  $F$  — сила трения между колесом и дорогой). Напомним, что сила трения зависит от величины нормального давления на колесо, т. е. той части общего веса автомобиля, которая приходится на ведущие колеса. Эта величина силы нормального давления называется сцепным весом. Наиболее эффективно сцепной вес используется на полноприводных автомобилях как показано в видео

[https://zen.yandex.ru/media/unlock\\_autoblog/razbiraemsia-pochemu-polnyi-privod-bezopasnee-pro-tiagovye-vozmojnosti-kolesa-5bca054da452a000ab7532fc](https://zen.yandex.ru/media/unlock_autoblog/razbiraemsia-pochemu-polnyi-privod-bezopasnee-pro-tiagovye-vozmojnosti-kolesa-5bca054da452a000ab7532fc)

***Подумайте, какие действия необходимо предпринять для увеличения сцепного веса? Как изменяется сцепной вес с изменением углов наклона дороги и углов уклона?***

Поскольку наше ТС является колесным, то необходимо заставить ведущее колесо вращаться, то есть к колесам должен быть приложен момент сил  $M$ . Этот момент называется моментом силы двигателя или крутящим моментом.

Поскольку ось колеса имеет радиус  $r$ , то и момент силы равен:

$$M_{\text{двиг}} = F_{\text{двиг}} * r \quad (4.1)$$

Под действием этого момента ведущие колеса будут вращаться.

Для движения транспортного средства нужно к нему приложить внешнюю силу, роль которой играет сила трения  $F_{\text{тр}}$ , возникающая между колесами радиуса  $R$  и поверхностью, на которую мы поставим модель транспортного средства. Возникает момент силы трения:

$$M_{\text{тр}} = F_{\text{тр}} * R, \quad (4.2)$$

противоположный моменту силы двигателя  $M_{\text{двиг}}$ .

Пусть  $\frac{d\omega}{dt}$  - угловое ускорение колес.

$J$  – Момент инерции ведущих колес.

Центр тяжести транспортного средства движется с ускорением:

$$a = \frac{F_{\text{тр}}}{m}, \text{ где } m \text{ – масса транспортного средства.}$$

Угловое ускорение колес будет зависеть от разности моментов двигателя и силы трения:

$$J \frac{d\omega}{dt} = F_{\text{двиг}} r - F_{\text{тр}} R \quad (4.3)$$

Колеса не будут скользить, если соблюдается условие равенства линейных скоростей колеса  $R \frac{d\omega}{dt}$  и ускорения транспортного средства:

$$ma = F_{\text{тр}} = \mu N \quad (4.4)$$

$$\frac{J}{R} a = F_{\text{двиг}} r - F_{\text{тр}} R \quad (4.5)$$

$$\frac{J}{R} a + F_{\text{тр}} R = F_{\text{двиг}} r \quad (4.6)$$

Разделим обе части на  $R$ :

$$\frac{J}{R^2} a + \frac{F_{\text{тр}} R}{R} = \frac{F_{\text{двиг}} r}{R} \quad (4.7)$$

Левую часть умножим и разделим на  $m$ :

$$\left( \frac{J}{mR^2} a + \frac{F_{\text{тр}} R}{m} \right) m = \frac{F_{\text{двиг}} r}{R} \quad (4.8)$$

$$\text{Поскольку: } F_{\text{тр}} = ma \quad (4.9)$$

$$\text{Получаем: } m \left( \frac{Ja}{mR^2} + \frac{ma}{m} \right) = \frac{F_{\text{двиг}} r}{R} \quad (4.10)$$

$$\text{Далее: } ma\left(\frac{J}{mR^2} + 1\right) = \frac{F_{\text{двиг}}r}{R} \quad (4.11)$$

Поскольку  $(J \ll mR^2)$ , то,  $J/mR^2$  стремится к нулю и тогда получим главную формулу движения транспортного средства

$$F_{\text{тр}} = ma = \frac{F_{\text{двиг}}r}{R} \quad (4.12)$$

Величина момента  $M_{\text{двиг}}$  может изменяться в широких пределах регулировкой силы тока в электромоторе (подачи топлива в цилиндры двигателя и т. п.). Между тем сила трения покоя  $F_{\text{тр}}$  не может превосходить определенной величины. Поэтому, если окажется, что  $F_{\text{тр}} < M_{\text{двиг}}/R$ , то уравнение (4.12) уже не может быть выполнено.

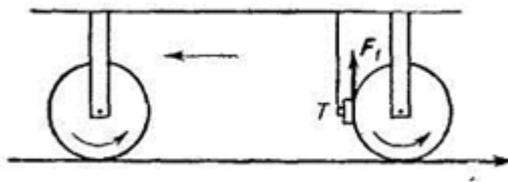


Рисунок. 4.7. – Возникновение силы торможения

При этом  $R \, d\omega/dt > a$ , т. е. возникает скольжение, колеса будут «буксовать».

Аналогично происходит и торможение транспортного средства. Пусть транспортное средство уже движется с постоянной скоростью, без

скольжения. Если пренебречь силами трения качения и трения в осях, то при движении с постоянной скоростью без скольжения сила трения вообще отсутствует.

Сила трения покоя возникает только тогда, когда без нее должно было бы возникнуть скольжение. При нажатии тормозной колодки  $T$  (рисунок 4.7.) возникает сила трения скольжения  $F_1$ , действующая на колеса и направленная в сторону, противоположную скольжению колес под колодкой. Эта сила должна замедлить вращение колес. Если бы скорость транспортного средства при этом не изменялась, то должно было бы возникнуть скольжение колес по дороге, направленное вперед (на рисунке 4.7. — влево). Вследствие этого со стороны дороги на колеса начинает действовать сила трения покоя  $F_{\text{тр}}$ , направленная назад. Эта внешняя сила и уменьшает скорость транспортного средства. И в этом случае, до тех пор, пока не возникло скольжения колес по дороге (по земле), справедливо уравнение (1), но в нем  $M_{\text{двиг}}$  — это момент сил трения, действующих со стороны тормозных колодок. Если колодки прижать так сильно, что  $M_{\text{двиг}}/R > F_{\text{тр}}$ , то возникает скольжение, называемое юзом. При этом со стороны дороги на колеса тоже действует сила трения, замедляющая движение транспортного средства, но это уже сила трения скольжения (а не трения покоя). Так как трение скольжения

обычно меньше максимального трения покоя, то при скольжении торможение происходит обычно медленнее, чем под действием максимальной силы трения покоя. Наиболее выгодные условия торможения получаются тогда, когда  $M/r$  лишь немного не достигает  $F_{тп}$ . Для этого нужно прижать тормозные колодки как раз до предела, при котором еще только-только не возникает скольжение колес. Если вы тормозите скольжением, намертво зажимая колеса, когда возникает юз, то тормозной путь будет длиннее, чем при торможении качением (колеса заторможены, но проворачиваются), зато скорость вначале падает более резко.

<https://kaminsky.su/blog/zavisimost-tormoznogo-puti-ot-sposobov-tormozheniya>

Поэтому при опасности наезда надо всегда тормозить юзом. Лучше ударить с меньшей скоростью, так как энергия удара пропорциональна квадрату скорости. Во всех остальных случаях надо тормозить качением: и тормозной путь будет короче, и шины меньше изнашиваются. В современных

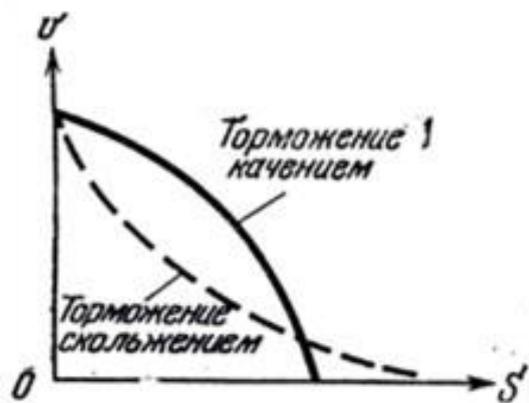


Рисунок.4.8. – Длина тормозного пути при разных способах торможения

автомобилях имеются специальные электронно – механические устройства, не позволяющие намертво заблокировать колеса ТС. Они называются антиблокировочными системами (АБС).

<https://www.youtube.com/watch?v=eHJCrXmSN0k>

<https://www.youtube.com/watch?v=e2He1slu9nc>

**общие принципы работы АБС.**

Рассмотрим теперь, как в результате действия внутренних сил, возникающих в моторе, изменяется общий момент импульса системы. Воспользуемся нашей схемой с электромотором. Под действием этих внутренних сил ротор мотора и колеса транспортного средства начинают вращаться в одну сторону, а статор электромотора вместе с корпусом транспортного средства должен был бы начать вращаться в другую сторону (на рисунке 4.5— по часовой стрелке). Однако вследствие наличия второй пары колес транспортного средства это вращение не возникает, но зато давление дороги на

**Выясните и опишите**

задние (на рисунке 4.5 — правые) колеса увеличивается, а на передние — уменьшается. Это изменение давлений можно заметить при трогании с места автомобиля. При резком включении сцепления передок автомобиля немного подбрасывает кверху.

<https://kaminsky.su/blog/fizika-tormozheniya-neuzheli-tormoznoj-put-ne-zavisit-ot-massy-avto>

<https://proza.ru/2015/11/24/1675>

Вследствие увеличения давления дороги на задние колеса и уменьшения давления на передние возникает внешний момент, который и обуславливает изменение момента импульса всей системы. Конечно, и при выключенном моторе существует давление со стороны дороги на колеса, а следовательно, и момент внешних сил относительно любой горизонтальной оси, параллельной оси колес. Но этот момент, как следует из условий равновесия, равен по величине и противоположен по направлению моменту силы тяжести относительно той же оси. Таким образом, результирующий момент внешних сил относительно какой-либо оси, параллельной оси колес, равен нулю до включения двигателя, после его включения становится отличным от нуля. Этот момент внешних сил и обуславливает возникновение момента импульса всей системы в целом. Что касается задних (на рисунке 4.5.— правых) колес, то, поскольку они не соединены приводом с двигателем, они вообще не вращались бы, если бы на них не действовали какие-либо силы трения. Поэтому в вопросе о трогании с места эти колеса не играют принципиальной роли.

Наоборот, в случае торможения на задние колеса (на рисунке 4.7— правые) их роль становится существенной, но зато не играют роли ведущие колеса (обычно торможение происходит при выключенном двигателе). Возникает вопрос, как внутренние силы, действующие между колесами и тормозной колодкой, могут уменьшить момент импульса этих колес, а значит, и всей системы в целом. Как и в случае трогания с места, при торможении возникают моменты внешних сил, обусловленные изменением давления со стороны дороги; при торможении увеличивается давление на передние (на рисунке 4.7 — левые) колеса.

Действительно, если бы передних колес не было, то под действием сил трения со стороны задних колес на тормозную колодку передний (на рисунке 4.7. — левый) конец ТС стал бы опускаться вниз. Аналогично тому, как это происходит при трогании с места, изменение внешних давлений на колеса приводит к появлению результирующего момента внешних сил относительно какой-либо горизонтальной оси, параллельной оси колес. Этот

внешний момент и обуславливает уменьшение момента импульса всей системы в целом. **Как изменяется положение кузова автомобиля при трогании с места, при разгоне и торможении? Почему на передние колеса ставят более эффективные тормоза?**

Выясним теперь, какую роль играют силы трения, действующие на другие, не присоединенные к двигателю и не снабженные тормозными колодками, колеса транспортного средства. Пусть на вторую пару колес (рисунок 4.5.) действуют силы трения со стороны оси, на которой колеса вращаются. Если бы действовала только эта сила трения, то при движении транспортного средства колеса не стали бы вращаться, возникло бы скольжение колес по дороге вперед. Поэтому со стороны дороги на колеса начинает действовать сила трения покоя, обозначенная нами как  $F_{тп}$ , препятствующая возникновению скольжения. Так как сила  $F_{тп}$  всегда принимает такое значение, что скольжения не возникает, то эта сила будет тем больше, чем больше трение в оси. (Если пренебречь моментом инерции колес, то момент силы  $F_{тп}$  должен быть все время равен моменту сил трения в оси.) Но сила  $F_{тп}$  направлена назад и уменьшает ускорение транспортного средства. Ускорение транспортного средства в этом случае определяется уравнением  $ma = F_{двиг} - F_{тп}$ . Напомним, что сила  $F$  это сила, приложенная к колесам со стороны двигателя.

Таким образом, внутренние силы — трение в осях колес — уменьшают ускорение всего транспортного средства в целом. Так как  $F$  не может быть больше, чем  $F_{тп}$ , то чем больше сила трения в осях, тем меньшим будет ускорение транспортного средства. Если окажется, что сила трения в осях больше силы трения колес о дорогу ( $F_{тп}$ ) ТС вообще не может сдвинуться с места. Поэтому тягач автопоезда иногда не может сдвинуться с места и «буксует» — сумма сил  $F_{тп}$ , действующих на колеса всех прицепов, оказывается больше, чем сила, которая может действовать на все ведущие колеса тягача.

Нетрудно дополнить всю картину, введя силы трения качения. При качении колес по дороге эти силы создают момент, который, так же как и момент сил трения в осях, должен быть уравновешен моментом силы трения  $F_{тп}$ . Чем больше момент силы трения качения, тем больше будет сила трения  $F_{тп}$  действующая на колеса со стороны дороги.

Таким образом, для движения транспортного средства благоприятны следующие условия: возможно большая величина  $F_{тп}$  между ведущими колесами и землей и возможно меньшая величина сил трения в осях и сил трения качения. **Рассмотрите влияние сцепного веса на эти факторы.**

В заключение рассмотрим еще один вопрос, касающийся самоходных колесных транспортных средств. Почему поворачивается автомобиль, если повернуть его передние колеса? Для того чтобы направление движения автомобиля изменилось, на него должна действовать внешняя сила  $F$  (рисунок 4.9) Происхождение этой силы

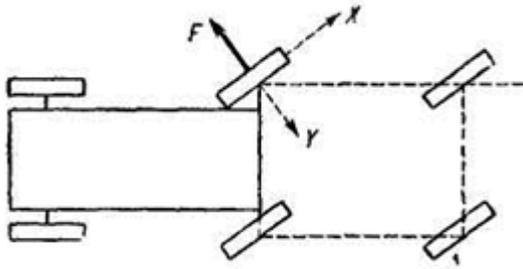


Рисунок 4.9. – Возникновение сил, изменяющих направление движения ТС

легко объяснить, приняв во внимание, что сила трения покоя начинает действовать, когда должно возникнуть скольжение, и она противоположна тому направлению, в котором должно было бы возникнуть скольжение. Допустим, что автомобиль продолжал бы двигаться прямолинейно. При этом колеса его продолжали бы вращаться.

Движение колес представляло бы собой качение в направлении  $X$  и скольжение в направлении  $Y$ . В результате этих двух движений колеса перемещались бы в направлении  $Z$ .

Скольжение, которое должно было бы возникнуть, если бы автомобиль продолжал двигаться прямолинейно, было бы направлено по  $Y$ , следовательно, возникает сила трения  $F$ , направленная навстречу  $Y$ . Эта внешняя сила  $F$  и изменяет направление движения автомобиля. На скользком месте, где силы трения малы, автомобиль не только буксует, но и не слушается руля.

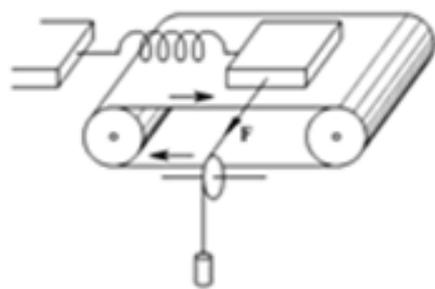


Рисунок 4.10. – Установка, поясняющая занос ТС

Одним из самых непредсказуемых и опасных движений транспортных средств является занос. Для того, чтобы разобраться, почему он происходит, рассмотрим установку, представляющую транспортерную

ленту, вращающуюся по часовой стрелке. На поверхности транспортера находится некоторый груз массой  $m$ , к которому прикреплена пружина в направлении вращения и нить, перекинутая через блок в перпендикулярном (рисунок 4.10.). Естественно, что силы, которые нужно приложить к бруску для того, чтобы сдвинуть груз в направлении движения и перпендикулярно ему при неподвижном транспортёре будут

одинаковы и равны  $\mu mg$ , т.е. коэффициенту трения  $\mu$ , умноженному на вес тела  $mg$ , равному реакции опоры  $N$  (транспортёр горизонтален). Положение существенно изменяется, если транспортёр приходит в движение. Значение действующей на брусок силы трения при его скольжении относительно ленты не зависит от скорости ленты и равна все той же величине  $\mu mg$  и направлена в сторону, противоположную движению ленты.

Если скорость движения ленты  $V_0$ , то относительная скорость движения бруска  $-V_0$ , а под действием боковой силы скорость движения  $V_1$ . Полная скорость движения бруска  $V_2$  и составляет угол  $\alpha$  с направлением движения ленты, причем  $\operatorname{tg} \alpha = V_1/V_0$ . Сила трения скольжения и в этом случае равна  $F_{\text{тр}}$ , но направлена в противоположную сторону  $V_2$ .

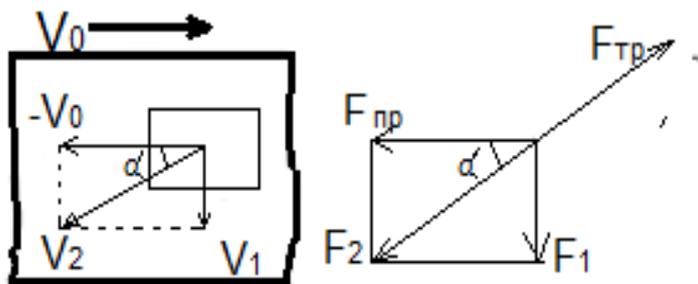


Рисунок 4.11. – Скорости и силы при заносе.

Векторная сумма силы натяжения пружины  $F_{\text{пр}}$ , силы  $F_1$ , действующей перпендикулярно направлению скорости ленты и силы трения

бруска об ленту  $F_{\text{тр}}$  по второму закону Ньютона равна нулю, поскольку брусок движется без ускорения.

Отсюда видно, что  $F_1 = F_{\text{тр}} \cdot \sin \alpha = \mu mg \sin \alpha$  – сила, необходимая для бокового перемещения меньше силы трения покоя  $\mu mg$  и тем ощутимее, чем меньше угол  $\alpha$ . Если скорость бокового скольжения бруска много меньше скорости движения ленты, то есть  $V_1 \ll V_0$ , то  $\operatorname{tg} \alpha = V_1/V_0 \ll 1$ . Известно, что для малых углов, которым и является угол  $\alpha$   $\sin \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha$  и формула принимает вид

$$F_1 = V_0 \mu mg V_1/V_0 \quad (4.13)$$

То есть, если лента двигается достаточно быстро, то перемещение бруска поперек движения может совершить сколь угодно малая сила.

При обычной нормальной езде колеса автомобиля катятся по дороге без скольжения (во всяком случае между некоторой частью шины и землей скольжение отсутствует), но при резком торможении скорость вращения колес сразу падает и возникает их скольжение по

полотну дороги вдоль направления движения автомобиля. Причем достаточно совсем небольших сил, чтобы колеса начали скользить в направлении, перпендикулярном к первоначальному направлению движения автомобиля, и автомобиль заносит в сторону.

<https://www.youtube.com/watch?v=xDMwyvY3xTo>

Если вместо бруска на рисунке 4.11 представить пятно контакта шины с дорогой, то все наши рассуждения окажутся верными и для транспортного средства. Если под действием силы  $F_{бок} = F_1$  (вызванной разницей сцепления шин с дорожным полотном, уклоном дороги, боковым ветром и т.п.) возникло движение с малой скоростью  $V_1$  в направлении, перпендикулярном к  $V_0$ , то составляющая силы трения, действующая на автомобиль со стороны дороги в этом направлении  $F'_1$ , оказывается пропорциональной скорости. В самом деле, сила трения всегда направлена навстречу скорости относительного движения. Когда возникает движение со скоростью  $V_1$  (рисунок 4.11), то скорость скольжения будет равна геометрической сумме  $V_0$  и  $V_1$ , т.е. изобразится вектором  $V_2$ . Значит, сила трения  $F_2$  будет направлена навстречу  $V_2$ , а по величине практически равна силе трения скольжения между колесами и дорогой  $F_{т.с.}$ . Тогда составляющая силы трения  $F_2$  в направлении, перпендикулярном к  $V_0$ , есть  $F'_1 = F_{т.с.} \sin \alpha$ . Но  $V_1 / V_0 = \tan \alpha$ , и если  $V_1 \ll V_0$ , то угол  $\alpha$  мал и  $\sin \alpha \approx \tan \alpha$ . Следовательно,  $F'_1 = V_1 / V_0 * F_2$  т. е. пропорциональна  $V_1$  — скорости движения в направлении, перпендикулярном к  $V_0$ . Дробь  $V_1 / V_0$  стремится к нулю и, следовательно, боковая сила, вызвавшая занос тоже стремится к нулю.

Сила  $F_1$  вызывающая скольжение со скоростью  $V_1$  может быть как угодно мала, и она все же вызовет движение в направлении, перпендикулярном к  $V_0$ , а это и значит, что в этом направлении застой отсутствует.

Следовательно, при движении транспортных средств, особенно автомобилей очень важным остается требование не заставлять колеса скользить, не ездить юзом, потому, что в такие моменты возникает занос, справиться с которым далеко не всем удастся. Для исключения такой ситуации в системе торможения автомобилей широко применяется антиблокировочная система (АБС)

В то же время незначительность продольной силы при скольжении вращающихся тел используется достаточно широко. Мы говорили уже об опасности заноса. Но водители высокого класса используют этот факт для движения гоночных автомобилей по трассе. Направив автомобиль в так называемый «управляемый занос» гонщики могут проходить повороты на больших скоростях

( <https://www.youtube.com/watch?v=cLUivSgkgY> ).

Этим же явлением объясняется, например, тот факт, что приводные ремни соскальзывают при остановке или резком уменьшении скорости ведомого шкива. При нормальной работе станка скольжение ремня отсутствует; при резком изменении скорости ведомого шкива возникает скольжение ремня. Тогда достаточно самых малых сил в направлении, перпендикулярном к скольжению, чтобы ремень начал двигаться вдоль оси шкива и соскочил с него (обычно эти малые силы существуют всегда вследствие не вполне параллельной установки ведущего и ведомого шкивов). Этим же явлением объясняется легкость движения вращающегося сверла в отверстии и застревание сверла в отверстии при его остановке. Часто, для того чтобы вытащить из доски гвоздь, мы его вращаем, что многократно снижает необходимую для вытаскивания гвоздя силу.

## Тема 5 Приработка механизма и износ. Изменение силы трения. Жидкое трение. Физика применения смазочных материалов. Жидкая и твердая смазка.

В инженерной практике трение скольжения как таковое не существует. В зависимости от состояния трущихся поверхностей трение разделяют на несколько типов:

**Сухое трение.** Сухое трение проявляется при взаимном относительном движении двух очищенных и высушенных твердых тел, находящихся в естественном контакте друг с другом. Под «естественным контактом» понимается непосредственное и тесное соприкосновение тел, возможное при минимальной загрязненности их поверхностей. Для выявления сухого трения сначала путем обработки с применением моющих средств и растворителей удаляют все масляные загрязнения. Затем наждачной бумагой наименьшей

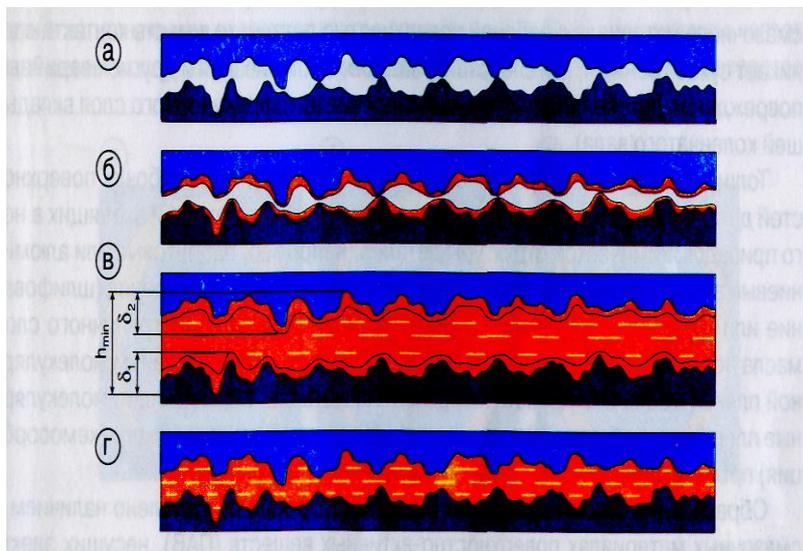


Рисунок 5.1. – Виды трения по наличию смазочного материала:

а – трение без смазки (сухое трение); б – граничное трение; в - жидкостное трение; г – смешанное трение

зернистости снимают немасляные загрязнения. После прополаскивания в дважды перегнанном спирте или эфире образцы высушиваются в инертной атмосфере или чистом воздухе. Считается, что очищенные и высушенные таким образом поверхности отвечают

условиям сухого трения.

Основополагающим является понятие статического коэффициента сухого трения (коэффициента трения покоя). Этот коэффициент  $\mu$  дается выражением:

$$\mu = F/N \quad (5.1)$$

где  $F$  – максимальная сила трения в момент трогания (рубежная сила статического трения), а  $N$  – сила нормального давления на поверхности их контакта (т.н. нормальная сила).

Статический коэффициент трения определяется методом скольжения образца по наклонной плоскости, как это было показано выше на опыте с телом, скользящем по книге. Угол  $\alpha$  наклона плоскости постепенно увеличивают до тех пор, пока образец не начнет скользить вниз,  $\alpha$ . – угол, при котором начинается скольжение (угол трогания).

Граничное трение. Образец для исследования граничного трения подготавливается так же, как и в случае сухого трения. Однако после очистки и сушки на его поверхность наносят тонкую пленку чистого смазочного материала известной молекулярной структуры с известными физико-химическими свойствами. Самой тонкой пленкой применительно к смазке является пленка толщиной в одну молекулу. Поэтому лабораторные исследования граничного трения обычно проводятся с телами, трущиеся поверхности которых покрыты мономолекулярным слоем смазки. Толщина пленки определяется в первую очередь общей формой поверхности и ее шероховатостью. Даже самые совершенные из существующих методов механической обработки не дают абсолютно ровной и гладкой поверхности. На практике вес образца, лежащего на плоскости, не распределяется равномерно по всей площади основания образца, а передается и воспринимается многочисленными отдельными микровыступами, имеющимися на обеих поверхностях. Как показал эксперимент, истинная площадь контакта может быть в тысячу раз меньше площади основания образца. Очевидно, что смазочная пленка (между исследуемым образцом и плоскостью), толщина которой несколько больше максимальной высоты выступов, будет полностью разделять две трущиеся поверхности. В случае поверхностей, обработанных по высшему классу чистоты, это условие выполняется при толщине пленки порядка 50–70 мкм, и тогда контактная пара ведет себя в соответствии с законами гидродинамики. Однако в режиме граничного трения смазочная пленка слишком тонка, чтобы она могла обеспечить полное разделение трущихся поверхностей. Самые высокие выступы обеих поверхностей при движении задевают друг за друга. При этом локальное контактное давление может быть столь большим, что возможна деформация материала. Интенсивность выделения энергии на микроучастках деформации нередко бывает такой, что происходят высокотемпературные вспышки частиц материала.

[https://www.youtube.com/watch?v=-P7iWOQ1z7k&list=PL-Y315lhDX3FBrm0x\\_fGShfzHkauOa7vH&index=41](https://www.youtube.com/watch?v=-P7iWOQ1z7k&list=PL-Y315lhDX3FBrm0x_fGShfzHkauOa7vH&index=41)

Для эффективной работы системы (с небольшим трением и без износа) необходимо, чтобы трущиеся элементы были всегда и полностью разделены слоем смазки при их движении и полностью разделены в период отсутствия движения.

*Как это реализуется на практике?*

<https://www.youtube.com/watch?v=YQ9ZdTgp63I>

Первое из этих требований выполняется путем оптимизации проектирования. При вращении шипа (шейки вала) в подшипнике в условиях жидкостного трения за счет внутреннего давления жидкости автоматически поддерживается такая толщина пленки смазочного материала, при которой поверхности кинематической пары, пока она работает, не могут прийти в прямое соприкосновение. Когда же машина останавливается, гидравлический подпор шейки вала в подшипнике прекращается, и толщина пленки смазки под шейкой уменьшается вследствие ее выдавливания силой тяжести вала. Само по себе это не страшно, но при последующем включении машины проходит некоторое время, пока не установится режим жидкостного трения. В этот начальный период подшипник работает в условиях граничного трения. В тяжелом механическом оборудовании некоторых типов предусматривается подача смазки в подшипник под давлением через отверстия и по канавкам в области контакта, благодаря чему перед пуском создается достаточно толстая, полностью защищающая поверхности контакта смазочная пленка. В режиме сухого трения противолежащие выступы контактирующих поверхностей трутся друг о друга и изнашиваются. По степени и характеру фрикционный износ может варьироваться в широких пределах от желательного (специальная операция тонкого полирования – притирки – в контролируемых условиях) до истирания, заедания и разрушения. В значительной части книг, в том числе и учебных, говорится, что для устранения этого явления пространство между трущимися деталями заполняют жидкостью и сухое трение заменяется на жидкое, исключая контакт между поверхностями. Исходя из этих посылок роль смазки может выполнять любая жидкость не выдавливаемая из зоны контакта. Как показывает опыт роль смазки значительно глубже и процессы, происходящие в зоне контакта более сложные. Рассмотрим процессы, протекающие в узле трения при недостаточном количестве смазки, - так называемом граничном трении.

Если пока не учитывать влияния химического состава смазочного материала, то можно представить себе несколько упрощенный механизм износа контактной пары, работающей в условиях граничного трения.

В точках локального контакта возникают напряжения сдвига, превышающие предел упругости, а температура материала повышается. Происходит срыв материала с вершечек выступов, а из-за своей ограниченной подвижности соседние молекулы смазки не успевают закрыть обнажившиеся участки контактной поверхности,

они остаются чистыми и химически активными. В результате образуются и при дальнейшем движении тут же разрушаются многочисленные мостики микросварки двух соприкасающихся поверхностей. При этом механическая энергия движения преобразуется в тепловую с повышением температуры поверхности. Разрыв мостиков микросварки дополнительно приводит к локальному резкому и значительному повышению температуры. В результате начинается химическое разложение смазки с образованием окислов, карбидов и смолистых отложений и медленно, но неуклонно снижается качество смазки. Ухудшение состояния поверхностей трения ускоряется из-за абразивного действия множества оторвавшихся частичек материала контактной пары. Все эти эффекты приводят к общему усилению трения, увеличению энергетических затрат и интенсификации износа.

[https://www.youtube.com/watch?v=\\_Kax-CoVwNw](https://www.youtube.com/watch?v=_Kax-CoVwNw)

***Как проявляет себя износ в конкретных машинах и механизмах?***

Очевидно, что работа машин и механизмов в условиях граничного трения крайне нежелательна по двум причинам: из-за потерь энергии и из-за риска отказа трущихся элементов вследствие неизбежного их изнашивания.

Далеко не каждая жидкость может выступать в роли смазки. От химических свойств смазочного материала существенно зависит развитие таких нежелательных явлений, как коррозия, образование смолистого остатка и углеродистых отложений. Установлено также, что некоторые химические компоненты смазки весьма способствуют уменьшению трения и износа. В условиях граничного трения химические свойства смазки гораздо важнее физических (вязкости, плотности, температуры вспышки и затвердевания). В условиях же жидкостного трения картина обратная. Так, например, вязкость смазки, не играющая большой роли при граничном трении, крайне важна в режиме жидкостного трения. Основным фактором в условиях граничного трения (тонкой пленки) является химическая структура молекул смазочного материала.

На свободной поверхности чистого твердого тела действуют молекулярные силы притяжения. Внутри тела такие силы уравниваются, а на поверхности остаются неуравновешенными и могут образовывать прочные связи с активными молекулами, если последние приблизятся на достаточное расстояние. Радиус действия этих сил - порядка долей нанометра. Свободные силы, действующие на поверхности, могут быть почти полностью нейтрализованы одним слоем нанесенных на нее активных молекул. Это иллюстрируется следующим опытом.

Предметное стекло микроскопа промывают чистящим средством и, когда оно высохнет, обливают слабым раствором пальмитиновой кислоты в чистом бензоле, а затем тщательно протирают тампонами из чистой тонкой (папиросной) бумаги. Если после такой обработки стекло окунуть в чистую воду и вынуть, оно останется совершенно сухим. Это свидетельствует о том, что водоотталкивающий слой молекул пальмитиновой кислоты образует прочное поверхностное соединение и не удаляется простым стиранием. При стирании удаляется вся нанесенная пальмитиновая кислота, кроме мономолекулярного слоя, поскольку поверхностные молекулярные силы резко ослабевают за пределами толщины первого, адсорбированного слоя. Этот прочный слой можно удалить сильным окислительным агентом, химически разрушающим молекулы пальмитиновой кислоты, или абразивом, удаляющим их механически. Пальмитиновая кислота, химическая формула которой имеет вид  $\text{COOH}-(\text{CH}_2)_{14}-\text{CH}_3$ , относится к классу органических соединений, молекулы которых обнаруживают высокую полярную активность с одного конца. Метильная группа  $\text{CH}_3$  на одном конце длинной цепной молекулы пальмитиновой кислоты неактивна, так как ее валентности заполнены. На другом же конце молекулы расположена очень активная карбоксильная группа  $\text{COOH}$ . Такая молекула связывается с поверхностью своим полярным концом, образуя как бы ковер, толщина которого равна длине одной молекулы. При этом молекулы ориентированы относительно поверхности под углом около  $90^\circ$  к ней. Поведение, например, хорошо всем известного сливочного масла, которое, по сути, и названию тоже может служить смазкой, удивительно контрастирует с поведением такого соединения, как пальмитиновая кислота. Углеводородные связи сливочного масла полностью насыщены, т.е. их молекулы не имеют незаполненных валентных связей и, следовательно, неактивны. Пленка сливочного масла, нанесенная на предметное стекло в опыте подобном описанному выше, легко удаляется простым стиранием, оставляя поверхность, легко смачиваемую водой. Очевидно, что силы связи в этом случае очень слабы, и пленка сливочного масла, по толщине соответствующая граничному трению, не может служить защитой от изнашивания поверхности.

Ранее способность смазочного материала уменьшать трение объясняли его «маслянистостью». Считалось, что маслянистость – это особое свойство масла, не связанное с его вязкостью. Теперь известно, что маслянистость есть результат взаимодействия молекулярных сил, существующих на свободной поверхности, с молекулярными силами, действующими на полярных концах ненасыщенных молекул в контактном слое смазки. Интересно, что половины процента активных

молекул в смазочном материале достаточно, чтобы заметно уменьшить трение. Это объясняется тем, что такие молекулы селективно адсорбируются на контактной поверхности.

***Приведите примеры машин и механизмов, в которых нельзя применять смазку. Как поступают в таких случаях?***

([https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=55&v=7gZO1IBPM6M&feature=emb\\_logo](https://www.youtube.com/watch?time_continue=55&v=7gZO1IBPM6M&feature=emb_logo)) и ( <http://avto-i-avto.ru/gsm-avto/mednaya-smazka-primeneniye.html> ).

## Тема 6 Механическая энергия и методы её аккумуляции. Принципы аккумуляции механической энергии.

Вопросы накопления, хранения и увеличения плотности накапливаемой энергии связаны с самыми передовыми и перспективными направлениями в науке и технике. От их решения зависит успех как ряда областей физики, так и большого числа самых разнообразных инженерных проектов.  
[https://www.youtube.com/watch?v=A2wb7A9\\_UUM&feature=emb\\_rel\\_en\\_d](https://www.youtube.com/watch?v=A2wb7A9_UUM&feature=emb_rel_en_d)

При производстве электрической энергии с использованием так называемых альтернативных источников (например, ветер, солнце) возникает проблема непостоянства их мощности, которая отсутствует при производстве энергии традиционными способами. Поэтому необходимо энергию источника вначале запасти в накопителе энергии,

а затем уже расходовать энергию накопителя, преобразуя ее, например, в электрическую энергию в необходимом количестве. При этом накопитель будет играть роль демпфирующего устройства, сглаживающего колебания мощности источника.

Предназначенное для этого устройство можно назвать аккумулятором (от лат. *accumulator* - собиратель) или накопителем энергии. Простейшим из них может служить груз, поднятый на некоторую высоту и использующий гравитационную энергию. Такие накопители применяются в копрах, часах и

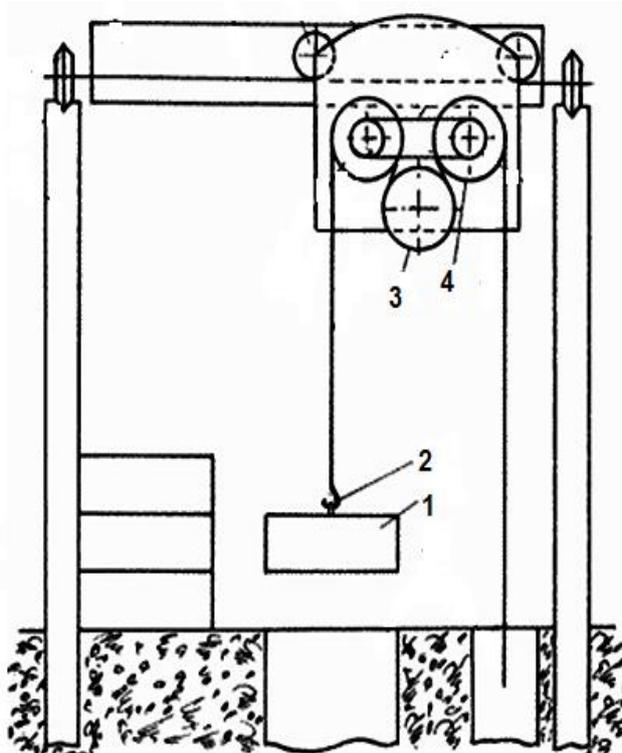


Рисунок 6.1 – Гравитационный аккумулятор копрового типа.

1- сменный груз, 2- крюк, 3- двигатель генератора, 4- редуктор и тормоз

т.п.

Поднятое на некоторую высоту тело (все равно - твердое или жидкое; главное, чтобы оно имело плотность большую, чем у окружающей среды) имеет запас энергии, которая называется потенциальной.

На рисунке 6.1. приведена схема устройства, которое предполагается использовать в качестве накопителя энергии в агрегате с генераторами, работающими от энергии солнца или ветра. В его основе лежит подъемно-транспортный механизм, способным перемещать по вертикальным направляющим тележку. Для крепления груза имеется специальный крюк. Груз может быть различным, в зависимости от количества установленных гирь. В конструкции предусмотрен редуктор и тормоз, что делает ее удобной при эксплуатации. Груз поднимается на высоту при помощи специального двигателя, запитанного от альтернативных источников энергии. При необходимости, груз отпускается, совершая при движении работу.

Проведем расчет для груза, поднятого на высоту 10 метров, массой 1000 кг. В этом случае запас энергии составит

$$E=1000 \times 9,81 \times 10 = 100 \text{ кДж или } 28 \text{ Вт*час.}$$

Такой гравитационный аккумулятор может хранить запас энергии бесконечно долго, а расходовать практически мгновенно. Это значит, что он может рассматриваться как вариант аккумулятора для накопления альтернативной энергии. К сожалению, этот запас мал и ограничен возможностями подъема массы на высоту. Тем не менее, механизмы, использующие потенциальную энергию, сыграли большую роль в развитии цивилизации.

<https://www.youtube.com/watch?v=2owZ5oLYREw>

Кстати, песочные часы могут считаться идеальной моделью гравитационного аккумулятора. В них песок, находящийся в верхнем сосуде, обладает запасом потенциальной энергии, который уменьшается по мере перетекания песка в нижний сосуд. Процессом можно управлять, прекращая движение песка.

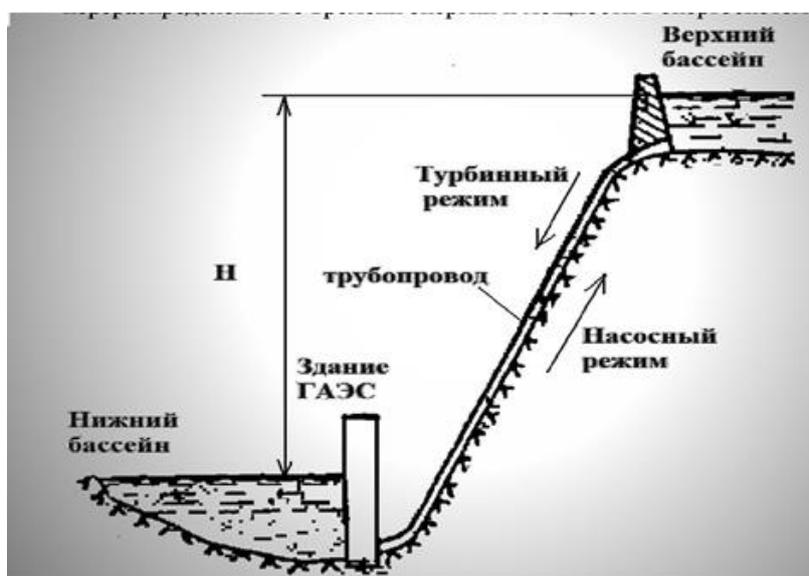


Рисунок 6.2. – Схема ГАЭС.

Выполним простой расчет гравитационного аккумулятора, работающего на основе запаса воды.

Для создания запаса энергии нужно воду поднять над поверхностью земли, закачав ее, например в бак. Для удобства расчета возьмем

десять тонн воды и представим, что они подняты на высоту, равную 10 метрам, тогда

$E=10000 \times 9,81 \times 10 = 1000000$  Дж или 1МДж, что равно 0,278кВт\*час.

Этого достаточно, чтобы в течение часа обеспечивать нагрузку в 280 Вт. Немного, но эффективность аккумулятора можно повысить простым путем, увеличив объем воды и высоту ее подъема.

Именно по такому принципу работают уже существующие и эксплуатируемые Гидро Аккумулирующие Электро Станции (ГАЭС) . Схема такой станции показана на рисунке 6.2.

<https://www.youtube.com/watch?v=M6-2ECxgnKQ>

Такой накопитель может работать бесконечно долго, он надежен и прост, но для его устройства нужно иметь соответствующие емкости для воды, которые нужно установить на необходимую высоту. [https://www.youtube.com/watch?v=M\\_jSDQt1Ff4](https://www.youtube.com/watch?v=M_jSDQt1Ff4)

На сегодняшний день есть немало предложений и разработок в области создания устройства, рассматриваемого как гидростатический аккумулятор энергии копрового типа, но идеального варианта пока нет.

Своеобразным аккумулятором гравитационной энергии являются приливные электростанции.

Известно, что в некоторых местах земного шара высота приливов достигает значительных величин.

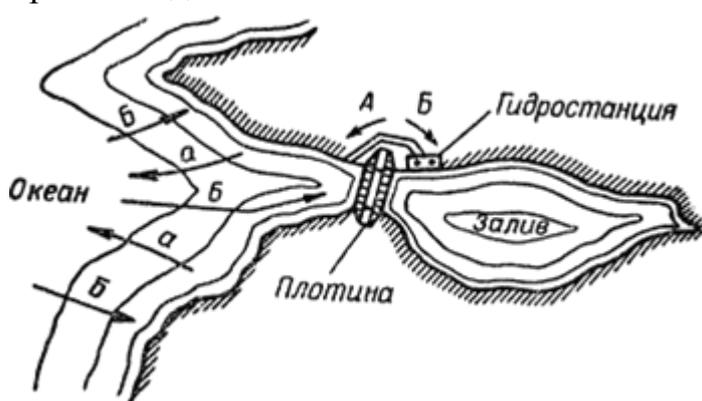


Рисунок 6.3 – Схема работы приливной электростанции

Особенностью приливных электростанций (ПЭС) является использование ими естественно возобновляемой энергии морских приливов, природа которых связана с приливообразующей силой, возникающей при гравитационном

взаимодействии Земли с Луной и Солнцем. Для водной оболочки Земли практическое значение имеет лишь горизонтальная составляющая приливообразующей силы. Из-за близости Луны к Земле величина прилива под воздействием Луны в 2,2 раза больше солнечного.

На побережьях морей и океанов наиболее часто встречается полусуточный прилив, у которого за лунные сутки (24 часа 50 мин) максимальная волна прилива приходит дважды.

Амплитуды и формы приливно-отливных волн на разных побережьях Мирового океана существенно различаются, что связано и с такими факторами, как глубина, конфигурация береговой линии и др. Так, максимальная величина прилива Амакс, составляющая 19,5 м, наблюдалась в Канаде в заливе Фанди на побережье Атлантического океана, 16,3 м – в Англии в устье р. Северн, 14,7 м – на севере Франции, 11,0 м – в России в Пенжинском заливе Охотского моря.

Подробно принцип работы приливной электростанции можно посмотреть здесь:

<https://www.youtube.com/watch?v=hcaA5mJX2pA>

***Приведите другие примеры использования аккумуляторов такого типа.***

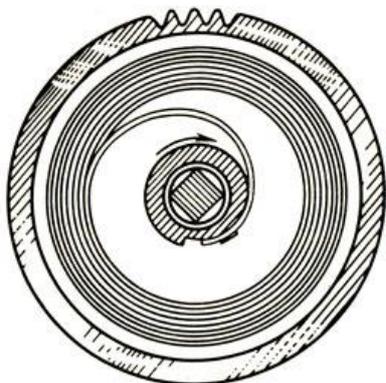


Рисунок 6.4. – Пружинный накопитель энергии

Первобытный изобретатель, внимательно наблюдая происходящее, стремился воспроизвести явления, которые видел. Он знал, что согнутая ветка возвращается в исходное положение. Это явление (упругость) использовалось для создания различных пружинных ловушек. Таким образом, был изобретен первый в мире упругий накопитель энергии.

Пружина (рисунок 6.4) относится к накопителям потенциального типа. Подобные механические накопители малой удельной энергии, имеющие упругие элементы, применяются очень давно. Примером реализации таких аккумуляторов являются детские игрушки, которые заводят ключом. Упругим элементом называют гибкие детали, способные деформироваться под нагрузкой. Пружины, мембраны, сильфоны и др. упругие элементы принимают всевозможные формы. Сильфон - тонкостенная трубка с гофрированной поверхностью. Назначение упругих элементов весьма разнообразно и мы будем рассматривать их с точки зрения накопления энергии.

Сжатие и распрямление пружины способно обеспечить очень большой расход и поступление энергии в единицу времени — пожалуй, наибольшую механическую мощность среди всех типов накопителей энергии. Она ограничена лишь пределом прочности материалов, но пружины обычно реализуют рабочее поступательное движение непосредственно. К примеру, до появления огнестрельного

оружия для боя на дистанции применялось именно пружинное оружие — луки и арбалеты, ещё задолго до новой эры полностью вытеснившие в профессиональных войсках пращу с её кинетическим накоплением энергии).

Пружинные двигатели широко использовались в граммофонах и патефонах.

Срок хранения накопленной энергии в сжатой пружине может составлять многие годы. Однако следует учитывать, что под действием постоянной деформации любой материал с течением времени накапливает усталость, а кристаллическая решётка металла пружины потихоньку изменяется, причём чем больше внутренние напряжения и чем выше окружающая температура, тем скорее и в большей степени это произойдёт.

При необходимости постепенной равномерной «зарядки» и «разрядки» пружины обеспечивающий это механизм может оказаться весьма сложным и капризным (загляните в те же механические часы — по сути, множество шестерёнок и других деталей служат именно этой цели).

Говоря здесь о пружинах, нужно иметь в виду не только металлические, но и другие упругие цельнотельные элементы. Самые распространённые среди них — это резиновые жгуты. Кстати, по энергии, запасаемой на единицу массы, резина превосходит сталь в десятки раз, зато и служит она примерно во столько же раз меньше, причём, в отличие от стали, теряет свои свойства уже через несколько лет даже без активного использования и при идеальных внешних условиях — в силу относительно быстрого химического старения и дегградации материала.

Другой разновидностью аккумуляторов, использующих потенциальную энергию упруго деформированных тел, являются пневматические и гидравлические аккумуляторы. В них энергия запасается в виде сжатого до большой величины газа, чаще всего воздуха. Аккумуляторы в виде баллонов со сжатым газом очень часто используются в системах управления (рисунок. 6.5 а.). Именно такой аккумулятор запасает энергию, которую используют для открывания дверей в автобусах или в пневматических тормозных системах. Они накапливают газ под большим давлением и отдают его в моменты наибольшего расходования с преобразованием в другие виды энергии или без этого преобразования.

<https://contur-sb.com/pnevmoakkumulyator-printsip-raboty/> и <https://www.youtube.com/watch?v=w7gqWvNKh58>

Однако в силу физических законов при зарядке такого аккумулятора часть энергии тратится на нагревание газа, что уменьшает к.п.д зарядки, а при выполнении работы в силу все тех же

газовых законов температура падает, уменьшая возможно выполняемую работу.

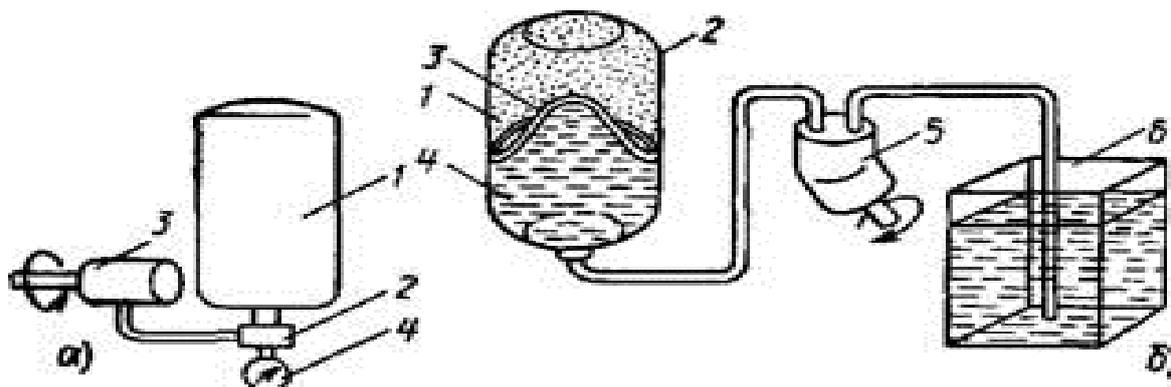


Рисунок 6.5 – Газобаллонные накопители: (1 — баллон со сжатым газом, 2— вентиль, 3—Пневмодвигатель, 4 — манометр); 6—совмещенная компоновка газобаллонного НЭ и гидравлического устройства (1—сжатый газ, 2—баллон, 3 — эластичная перегородка, 4—масло, 5 — гидромашина, 6—масляный резервуар)

Оценим энергетические характеристики такого аккумулятора.

В стальной резервуар емкостью 1 м<sup>3</sup> закачивается воздух под давлением 50 атмосфер. Чтобы выдержать такое давление, стенки резервуара должны иметь толщину примерно 5 мм. Сжатый воздух используется для выполнения работы. При изотермическом процессе работа  $A$ , совершаемая идеальным газом при расширении в атмосферу, определяется формулой:

$$A = (M / m) R T \ln (V_2 / V_1) \quad (6.1)$$

где  $M$  - масса газа,  $m$  - молярная масса газа,  $R$  - универсальная газовая постоянная,  $T$  - абсолютная температура,  $V_1$  - начальный объем газа,  $V_2$  - конечный объем газа.

С учетом уравнения состояния для идеального газа

$$(P_1 V_1 = P_2 V_2) \quad (6.2)$$

для данной реализации накопителя  $V_2 / V_1 = 50$ ,  $R = 8.31$  Дж/(моль · град),  $T = 293$  0К,  $M / m \sim 50 : 0.0224 \sim 2232$ , работа газа при расширении  $2232 \cdot 8.31 \cdot 293 \cdot \ln 50 \sim 20$  МДж  $\sim 5.56$  кВт\* час за цикл. Масса накопителя примерно равна 250 кг. Удельная энергия составит 80 кДж/кг. При работе пневматический накопитель может в течение часа обеспечивать нагрузку не более 5.5 кВт.

Срок службы пневматического накопителя может составлять 20 и более лет. Достоинства: накопительный резервуар может быть расположен под землей, в качестве резервуара могут использоваться стандартные газовые баллоны в требуемом количестве с соответствующим оборудованием, при использовании ветродвигателя последний может непосредственно приводить в действие насос компрессора, имеется достаточно большое количество устройств, напрямую использующих энергию сжатого воздуха.



Рисунок 6.6. – Аккумулятор давления.

Достаточно широко используются гидравлические аккумуляторы, по сути являющиеся разновидностью аккумуляторов, использующих силу упругости, - устройства, накапливающие под давлением жидкость, поступающую от насосов, и отдающие ее в моменты наибольшего расходования с преобразованием в другие виды энергии или без нее (рисунок 6.6.) Такие аккумуляторы часто называют аккумуляторами давления. Наиболее широко они используются в системах питания бензиновых двигателей с системами питания впрыском топлива через форсунки. Для безотказной работы системы необходимо, чтобы в системе питания двигателя всегда сохранялось достаточно высокое давление, что и обеспечивается этими устройствами. При этом следует различать буферные запасы жидкости и собственно жидкостные аккумуляторы давления.

Кинетические накопители энергии или гироскопические накопители аккумулируют энергию маховика, который находится во вращении с большой скоростью. В настоящее время запасаемая при помощи маховика энергия достигла 3 ГДж/кг. Удельная энергия данного накопителя существенно выше, чем она же у гравитационного накопителя. К преимуществам маховиков относят возможность передачи и получения почти неограниченную мощность. К

Некоторой разновидностью пневматических аккумуляторов являются аккумуляторы, где в качестве рабочего тела используется жидкость (рисунок 6.5. б) Это позволяет исключить резкое падение температуры воздуха и обмерзание рабочих органов. Именно такая система используется чаще.

***Приведите примеры и особенности устройства гидравлических и пневматических аккумуляторов.***

недостаткам этих накопителей относят: их высокую стоимость; сложность изготовления; высокая скорость вращения маховика требует наличие сложной системы трансформации крутящего момента.

Маховики - наиболее совершенные инерционные аккумуляторы механической энергии вращения, используемые также для уменьшения неравномерностей вращения валов различного типа. На практике маховики как аккумуляторы уже неоднократно применялись. Наиболее широко в настоящее время маховичные двигатели используются в детских игрушках с так называемым «инерционным» двигателем и в устройствах, требующих больших мощностей в короткие промежутки времени (промышленные штампы, прессы, ножи для резки бумаги и металла). Широкое применение маховики получили для вывода механизмов из так называемых «мертвых точек». А в 1860 году российский изобретатель, инженер-поручик З.Шуберский опубликовал идею использования мощных маховиков на железнодорожном транспорте, новый вид транспорта назвали «маховозом».

Теоретически с помощью маховиков можно было бы решить и иную задачу: запасти достаточное количество энергии, для чего необходимо значительно увеличивать массу и скорость вращения, однако на практике использование быстровращающихся маховиков может быть не только опасным, но и невозможным: нагрузки на материал маховика при нужных скоростях значительно превосходят пределы прочности.

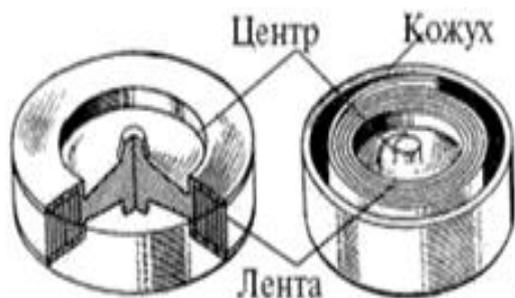


Рисунок 6.7.—Устройство супермаховика

Оценим энергию, которую может накопить простой маховик.

Энергия, запасаемая в маховике, может быть найдена по формуле  $E = 0.5 J \omega^2$ , где  $J$  - момент инерции вращающегося тела.

Для цилиндра радиуса  $R$  и высотой  $H$ :

$$J = 0.5 \rho r R^4 H \quad (6.3)$$

где  $\rho$  - плотность материала, из которого изготовлен цилиндр.

Предельная линейная скорость на периферии маховика  $V_{max}$  (составляет примерно 200 м/с для стали).

$$V_{\max} = w_{\max} R \text{ или } w_{\max} = V_{\max} / R \quad (6.4)$$

$$\text{Тогда } E_{\max} = 0.5 J w_{\max}^2 = 0.25 \rho r R^2 H V_{\max}^2 = 0.25 M V_{\max}^2 \quad (6.5)$$

Удельная энергия составит:  $E_{\max} / M = 0.25 V_{\max}^2$

Для стального цилиндрического маховика максимальная удельная энергия составляет



Рисунок. 6.8. Маховик в сборе

приблизительно 10 кДж/кг. Для маховика массой 100 кг ( $R = 0.2$  м,  $H = 0.1$  м) максимальная накопленная энергия может составлять  $\sim 0.278$  кВт час. При работе накопитель может в течение часа обеспечивать нагрузку не более 280 Вт. Срок службы маховика может составлять 20 и более лет. Достоинства: накопленная энергия может быть использована в течение короткого промежутка времени.

Разрыв быстровращающегося маховика очень часто приводит к эффекту, сравнимому со взрывом бомбы. Преодолеть эту опасность можно, например, изменением конструкции маховика. Безопасным считается вращающийся диск, собранный из металлической ленты (рисунок 6.7). Такие маховики называются супермаховиками. Это они являются чемпионами по накоплению энергии. Разорвавшийся от предельных нагрузок виток ленты в экспериментах не пробивал даже тоненького, как консервная банка, кожуха.

Так или иначе, если не считать создания нескольких экспериментальных моделей маховичных автомобилей, работа по созданию и испытанию супермаховиков в мире практически не ведется, хотя это направление и обещает большие открывающиеся перед конструкторами перспективы. Динамический накопитель - чемпион по плотности запасенной энергии (рисунок 6.8.). Но он содержит движущиеся части. Это - недостаток.

Сравнивая параметры различных накопителей энергии, приведенных в таблице 1, легко видеть, что наиболее перспективными аккумуляторами являются супермаховики, несмотря на их относительную дороговизну. Следующими за ними идут пневматические аккумуляторы. И те и другие в настоящее время

используются для накопления энергии в часы так называемых минимумов потребления электроэнергии (ночью), чтобы отдать эту энергию в сеть в часы энергетического максимума (днем).

Таблица 1. Параметры различных накопителей энергии

Накопитель энергии	Характеристики возможной реализации накопителя	Запасенная энергия, кДж	Удельная энергия, кДж/кг	Срок службы, лет
Копровый	Масса копра 2 т, высота подъема 5 м	100	0.05	более 20
Гидравлический гравитационный	Масса воды 10 т, высота перекачки 10 м	1000	0.1	более 20
Маховик	Стальной маховик массой 100 кг, диаметр 0.4 м, толщина 0.1 м	1000	10	более 20
Свинцово-кислотный аккумулятор	Емкость 190 А · час, выходное напряжение 12 В, масса аккумулятора 70 кг	3900	56	3 ... 5
Пневматический	Стальной резервуар объемом 1 м <sup>3</sup> массой 250 кг со сжатым воздухом под давлением 50 атмосфер	20000	80	более 20
Супермаховик	Углепластиковое волокно. Высота 40 см, объем 40 л и масса 75 кг при 60 тыс. оборотов в минуту	40 875	545.	5-20

Интересующихся более подробно, отсылаем к статьям, широко освещающим этот вопрос в Интернете

( <https://www.youtube.com/watch?v=FUPX1KEtGmA> ).

Из таблицы видно, что пневматические накопители энергии тоже являются очень перспективными. Их стоимость в основном определяется тем, что для хранения воздуха под большим давлением требуются очень прочные сосуды.

Исследователи из Ноттингемского университета (Великобритания) под руководством профессора Seamus Garvey, предложили новую идею, которая выгоднее ранее рассматривавшихся. Они испытывают Energy Bag — огромный

надувной мешок, закоренный на небольшой глубине неподалёку от Оркнейских островов (Шотландия). Подводные мешки являются интересным вариантом, потому что море выступает в качестве сосуда под давлением, а плотность энергонакопления пневматического аккумулятора растет прямо пропорционально давлению. Нет расходов на полную инфраструктуру, только конструкционные материалы, необходимые для удержания мешка на дне. Не нужно ни метра суши. Независимо от того, полон или пуст контейнер, давление остается прежним, и это облегчает работу оборудования на поверхности моря.

Более подробно идея изложена на странице [https://www.youtube.com/watch?v=ktup6CAvfGo&feature=emb\\_logo](https://www.youtube.com/watch?v=ktup6CAvfGo&feature=emb_logo)

**Тема7 Колебания в технике. Сложение колебаний и резонанс. Вибрация. Вибрационное сглаживание и вибротранспорт. Фрикционные автоколебания. Инфразвук и ультразвук. Использование и учет в технике**

Колебаниями называются процессы, отличающиеся той или иной степенью повторяемости. При колебаниях маятника повторяются отклонения его в ту и другую сторону от вертикального положения. Маятником является всякое тело, подвешенное так, что его центр тяжести находится ниже точки подвеса. При колебаниях пружинного маятника повторяются отклонения его вверх и вниз или влево-вправо от некоторого среднего положения.

Колебания маятника происходят потому, что: 1) сила тяжести возвращает отклоненный маятник в положение равновесия; 2) вернувшись в положение равновесия, маятник, обладая скоростью, продолжает двигаться (по инерции) и снова отклоняется от положения равновесия в сторону, противоположную той, откуда он пришёл. Колебания груза происходят потому, что: 1) упругая сила сжатой или растянутой пружины возвращает груз из смещенного влево или вправо (вверх или вниз) положения в положение равновесия; 2) вернувшись в положение равновесия, груз обладает скоростью и по инерции «проскакивает» через это положение, чем вызывается растяжение (или сжатие) пружины (рисунок 7.1.). Таким свойством повторяемости обладают, например, качания маятника часов, колебания струны или ножек камертона, напряжение между обкладками конденсатора в контуре радиоприемника и т. п.

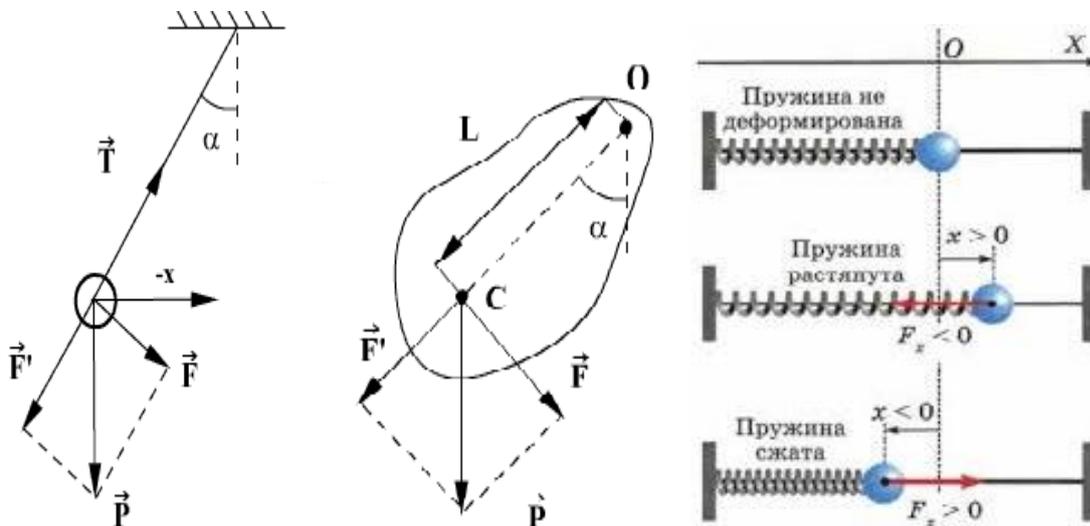


Рисунок 7.1. – Математический, физический и пружинный маятники

Физика и техника имеют дело с колебаниями, весьма разнообразными по своей физической природе, характеру и степени повторяемости, скорости смены состояний, «механизму» возникновения. По своей физической природе могут быть выделены, в частности, колебания:

а) механические, например, колебания маятника, моста, корабля на волне, струны; колебания плотности и давления воздуха при распространении в нём упругих (акустических) волн, в частности слышимого звука;

б) электромагнитные, например колебания в колебательном контуре, объёмном резонаторе, волноводе, колебания напряжённостей электрического и магнитного полей в радиоволнах, волнах видимого света и любых др. электромагнитных волнах;

в) электромеханические (колебания мембраны телефона, пьезокварцевого или магнитострикционного излучателя ультразвука);

г) химические (колебания концентрации реагирующих веществ при так называемых периодических химических реакциях);

д) термодинамические (например, так называемое поющее пламя) и др.

Таким образом, колебания охватывают огромную область физических явлений и технических процессов. В частности, колебания имеют первостепенное значение в судостроении, самолетостроении, электротехнике, технике автоматического регулирования. На их использовании основана вся радиотехника и техническая акустика. Колебания встречаются также в метеорологии, химии, физиологии (например, пульсации сердца) и в ряде других естественных наук.

<https://www.youtube.com/watch?v=VvPDvpGX50I>

Периодическим называется повторяющееся движение, у которого каждый цикл в точности воспроизводит любой другой цикл. В действительности не всегда и не при всяких условиях повторение совершенно одинаково. В одних случаях каждый новый цикл очень точно повторяет предыдущий, в других случаях различие между следующими друг за другом циклами может быть заметным. Отклонения от совершенно точного повторения очень часто настолько малы, что ими можно пренебречь и считать движение повторяющимся вполне точно, т.е. считать его периодическим.. С точки зрения кинематики можно выделить некоторые важнейшие типы колебания, где колеблющаяся величина  $s$  может быть любой физической природы (механическое смещение твёрдого тела, уплотнение газа, сила тока и т.д.). поясняет общий случай периодического колебания; здесь каждое значение  $s$  повторяется неограниченное число раз через одинаковые промежутки времени  $t = T$ :

$$s(t+T)=s(t). \quad (-\infty < t < \infty). \quad (7.1)$$

$T$  называется периодом.

Число колебаний в единицу времени  $n = 1/T$  называется частотой колебаний. Частными случаями периодических колебаний являются колебания прямоугольные, пилообразные, синусоидальные (или гармонические,). В последнем случае

$$s = A \cos(\omega t - \varphi), \quad (7.2)$$

где  $A$ ,  $\omega$ ,  $\varphi$  — постоянные. Величина  $A$  (максимальное значение  $s$ ) называется амплитудой. Так как значения  $\cos(\omega t - \varphi)$  повторяются при возрастании аргумента на  $2\pi$ , то  $\omega T = 2\pi$  и, следовательно,

$$\omega = 2\pi / T = 2\pi n. \quad (7.3)$$

Величина  $\omega$  называется круговой, или циклической, частотой, которая равна числу колебаний за  $2\pi$  единиц времени. Функция времени  $\omega t$  — (называется фазой колебания, постоянная  $\varphi$  — начальной фазой (часто её называют просто фазой)).

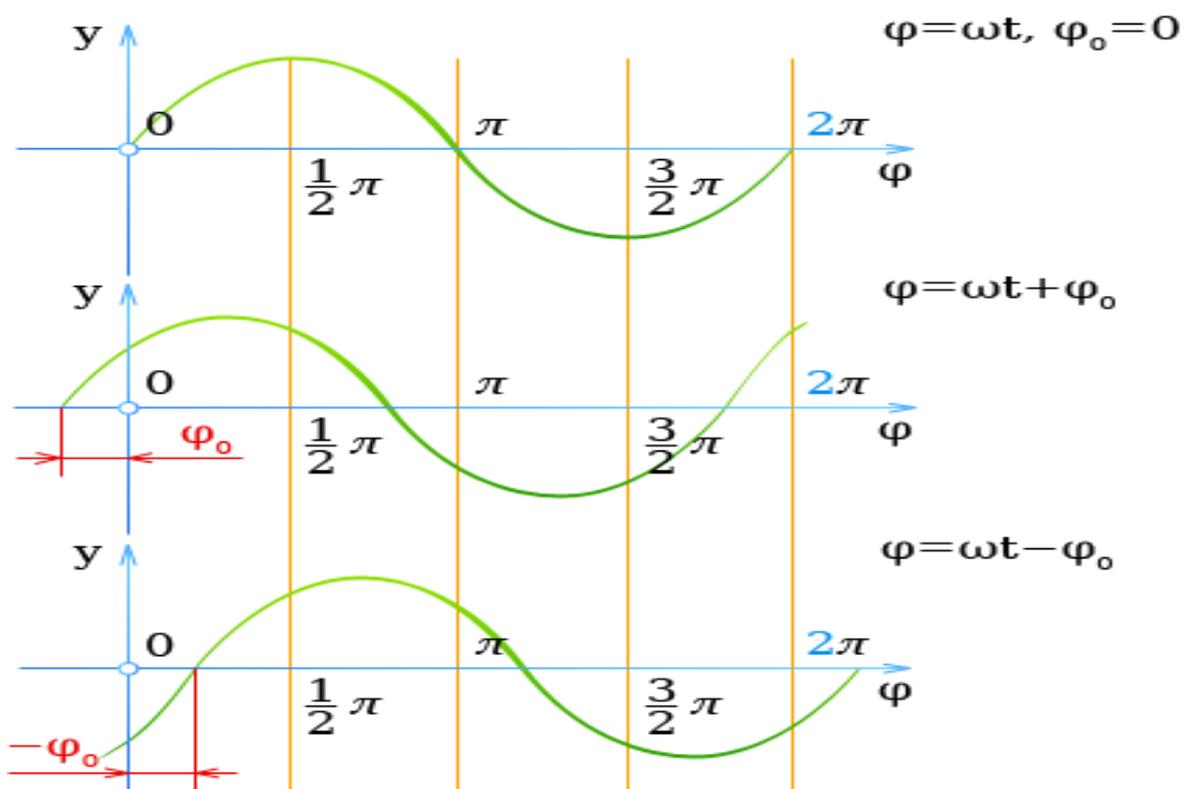


Рисунок 7.2.— К понятию фазы колебаний

Таким образом, подытожив сказанное, колебательным системам присущ ряд общих свойств:

1. У каждой колебательной системы есть состояние устойчивого равновесия. 2. Если колебательную систему вывести из состояния устойчивого равновесия, то появляется сила, возвращающая систему в устойчивое положение.

3. Возвратившись в устойчивое состояние, колеблющееся тело не может сразу остановиться.

Рассмотрим динамику свободных колебаний в идеальных колебательных системах без трения. Отведем маятник от положения равновесия. В этом случае равнодействующая силы тяжести и силы упругости нити направлена в сторону положения равновесия.

Период колебаний маятника, близкого по своим свойствам к математическому маятнику, не зависит от массы маятника. Заставим маятник описывать коническую поверхность. В этом случае шарик маятника движется по окружности.

Смещение по времени выражается в долях периода, а сдвиг или разность фаз – в угловых единицах. Если второе колебание запаздывает по сравнению с первым на  $1/8$  периода, то это значит, что оно отстает по фазе на  $360 \cdot 1/8 = 45$ , или сдвинуто по фазе на  $-45$ . Если второе колебание опережает первое на  $1/8$  периода, то говорят, что оно опережает его по фазе на  $45$ , или сдвинуто по фазе на  $+45$ . Если колебания происходят без запаздывания, то их называют синфазными, или говорят, что они совершаются в фазе. При

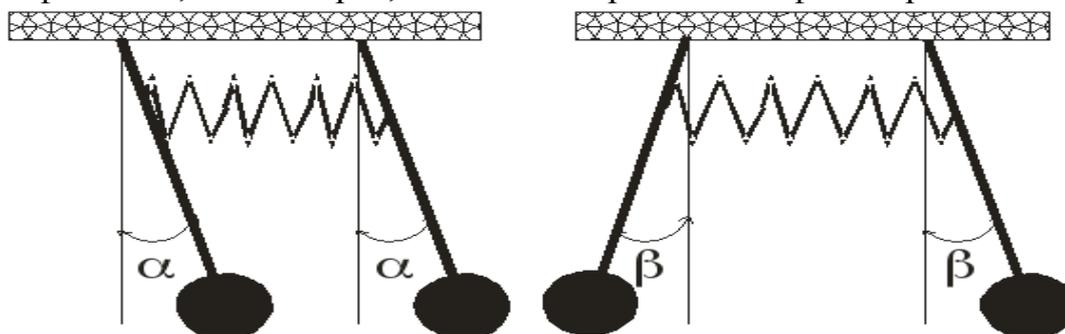


Рисунок 7.3. – Синфазные и противофазные связанные колебания.

запаздывании одного на полпериода говорят, что колебания происходят в противофазе.

**На одном чертеже, в соответствии со сказанным выше, изобразите в виде графиков синфазные и противофазные колебания.**

В природе, и особенно в технике, чрезвычайно большую роль играют колебательные системы, т.е. те тела и устройства, которые

сами по себе способны совершать периодические движения. «Сами по себе» - это значит, не будучи принуждаемы к этому действием периодических внешних сил. Такие колебания называются, поэтому свободными колебаниями в отличие от вынужденных, протекающих под действием периодически меняющихся внешних сил.

Между отдельными частями технических устройств очень часто нет жесткой связи, а существует гибкая связь. Например, связь между кузовом автомобиля и колесами осуществляется через гибкие пружины или рессоры. В процессе движения механизмов возникают колебания одной части (колес) которые передаются другой части (кузову). Такие колебательные системы называются связанными. Мы уже упоминали о таких случаях, когда периодическое движение тела происходит не свободно, а в результате действия периодически меняющейся силы. Подобные повторяющиеся силы вызывают периодическое движение даже таких тел, которые сами не являются колебательными системами. Но как будет обстоять дело в том случае, если периодическая система действует на колебательную систему.

1. В колебательной системе, на которую действует периодически меняющаяся сила, устанавливается периодическое движение.

2. Частота вынужденных колебаний равна частоте действующей силы.

Если постепенно увеличивать частоту вынуждающей силы то рано или поздно мы увидим, что когда частота вынуждающей силы приблизится к собственной частоте колебательной системы, то амплитуда колебаний резко возрастает. Амплитуда колебаний максимальна, когда частота вынуждающей силы равна собственной частоте колебательной системы. При дальнейшем росте частоты вынуждающей силы амплитуда колебаний уменьшается.

Явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний при равенстве частот вынуждающей силы и собственной частоты колебательной системы называется резонансом. В чем причина явления резонанса, почему растет амплитуда колебаний, когда частота вынуждающей силы приближается к собственной частоте. Совпадение частот означает, что сила упругости действует «в такт» с вынуждающей силой. Если сила упругости и вынуждающая сила в какие-то моменты действуют в одном направлении, то они складываются и их действие усиливается. И даже если вынуждающая сила мала, она все равно приведет к росту амплитуды. Ведь эта малая сила будет добавляться к силе упругости каждый период.

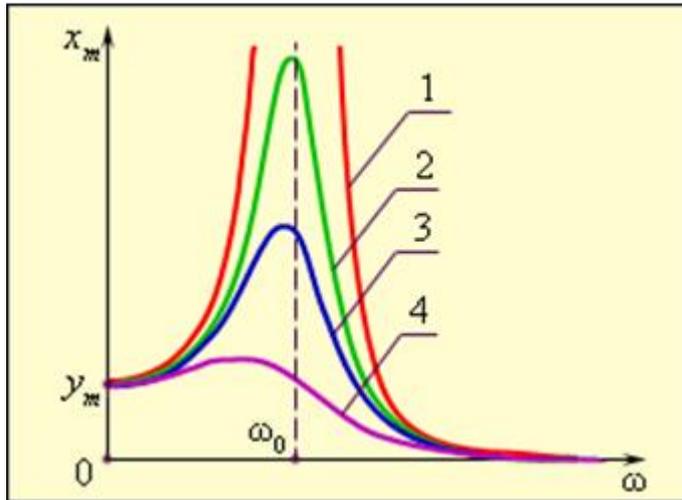


Рисунок 7.4. – Явление механического резонанса. Возрастание сил трения в системе происходит от №1 к №4.,  $\omega_0$ - собственная частота колебательной системы

свойства *гармонического осциллятора*. Колебания станут нелинейными и рост амплитуды прекратится. Максимальная амплитуда установившихся колебаний достигается при резонансе, т. е. при  $\omega = \omega_0$ . Явление резонанса может быть полезным, поскольку оно позволяет получить даже с помощью малой силы большое увеличение амплитуды колебаний. С другой стороны, резонанс может оказаться вредным и даже опасным. Если, например, на фундаменте установлена машина, в которой какие-нибудь части совершают периодические движения, то колебания передаются фундаменту и он будет совершать вынужденные колебания. Фундамент – это тоже колебательная система со своей собственной частотой. [https://www.youtube.com/watch?v=Cp\\_gBbsk3us](https://www.youtube.com/watch?v=Cp_gBbsk3us)

И если частота периодических движений совпадает с собственной частотой фундамента, то амплитуда его колебаний может возрасти настолько, что это приведет к его разрушению. При работе многих технических установок возникают опасные вынужденные колебания (опор паровых турбин, мостов, самолетов, двигателей внутреннего сгорания). Следует подчеркнуть, что при определенных условиях даже небольшая периодическая сила может быть гораздо более разрушительной для конструкции, чем много большая постоянная. Наиболее сильно это проявляется при частотах вынужденных колебаний, близких к собственной частоте конструкции. Например, движущийся вагон наиболее сильно раскачивается, если частота его колебаний на стыках рельсов совпадает с собственной частотой колебаний. Решите следующую задачу: длина рельса 15 м, собственная частота колебаний вагона —

Если в рассмотренной нами системе *трение* отсутствует, то амплитуда установившихся колебаний неограниченно возрастает по мере приближения  $\omega$  к  $\omega_0$ . На практике, однако, в любой системе имеются потери энергии. При значительном увеличении амплитуды колебаний они становятся заметными, и рассмотренная система теряет простые

0,5 с. Определите скорость движения поезда, при которых наступает явление резонанса. Для наблюдения механического резонанса достаточно, например, разогнаться в легковом автомобиле по проселочной дороге с “гребенкой” от нуля до примерно 60 км/ч. При этом амплитуда колебания подвески (а соответственно и грохот кузова) будет возрастать примерно до 40 км/ч, и уменьшаться при дальнейшем росте скорости. Это происходит вследствие того, что приблизительно при сорока километрах в час частота ударов колеса о



Рисунок 7.5 – Резонансное разрушение вертолета

гребенку совпадает с резонансной частотой подвески. Последнюю можно вычислить, измерив характерное расстояние между гребнями гребенки, и определив скорость, сопровождающуюся максимальной вибрацией, по спидометру. При меньших скоростях это происходит при движении на автомобиле по следу гусеничного трактора на грунтовой дороге.

Во многих технических устройствах вынужденные колебания отдельных частей конструкции оказываются исключительно вредными. Например, колебания лопаток и дисков паровых и газовых турбин, пропеллеров и винтов самолетов и вертолетов могут привести к поломке лопатки турбины или крушению самолета или вертолета. Причем одна сломанная деталь практически мгновенно выводит из

стройка весь механизм. На рисунке 7.5. показаны фазы крушения вертолета из-за поломки части одного из винтов. Именно поэтому с опасными результатами резонанса нужно бороться, т. е. его не допускать. Для этого заранее рассчитывают частоты колебаний машин, фундаментов, средств транспорта и т.д., с тем, чтобы при обычных условиях их эксплуатации резонанс не мог наступить. С явлением резонанса мы встречаемся и в повседневной жизни. Если в комнате задрезжали оконные стекла при проезде по улице тяжелого грузовика, то это значит, что собственные частоты колебаний стекла совпали с частотой колебаний машины. Явление резонанса несколько раз самым трагическим образом проявлялось в мостостроении. В качестве примера можно привести одно из

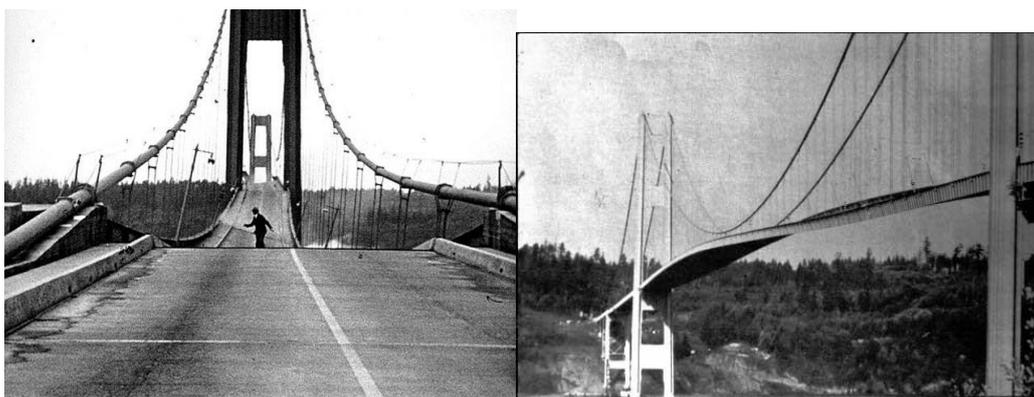


Рисунок 7.6. – Ветровой резонанс Такомакского висячего моста длиной 855 м,

наиболее известных — крушение моста через пролив Такома (США). Водители автомобилей, проезжавшие утром 7 ноября 1940 г. по Такомакскому висячему мосту длиной 855 м, переброшенному через Такомакский пролив (США), оказались свидетелями необычного, на первый взгляд сверхъестественного явления. Несмотря на сравнительно небольшой ветер (17 м/с), проезжая часть изгибалась с частотой 36 колебаний в минуту. При этом амплитуда колебаний моста достигла 1,5 м. Движение по мосту прекратилось, многие автомобили остались брошенными на мосту, так как водители отчаялись вывести их в безопасное место. Амплитуда колебаний возрастала. Лопнуло центральное крепление, после чего колебания моста изменили свой характер, их амплитуда резко увеличилась, и вскоре обломки моста рухнули в воды Такомакского пролива.

Виновником трагического происшествия явился резонанс моста, вызванный вихрями воздуха, которые периодически отрывались от него под воздействием ветра. Частота отрыва этих вихрей совпала с одной из собственных частот колебаний моста, энергия ветра стала эффективно поглощаться колеблющейся системой, амплитуда

колебаний недопустимо возросла, что и привело к разрушению этого гигантского сооружения. Для борьбы с резонансом конструкторам приходится учитывать много факторов, в частности то, что при длине пролета моста порядка 100 м частота основного тона колебаний<sup>1</sup> — 2 Гц.



Рисунок 7.7. – «Ганцующий мост» в Волгограде

Несмотря на хорошую изученность явления и неоднократные аварии с мостами последний случай резонансных колебаний мостов отмечен в Волгограде (рисунок 7.7).. Как эту проблему решили современные инженеры можно

посмотреть в Интернете:

(<https://www.youtube.com/watch?v=CAjGeYzITUo>). Еще одним интересным примером вынужденных колебаний являются колебания типа флаттер, возникающие под действием аэродинамических сил. Особенно опасны эти колебания для самолетов, так как при флаттере амплитуда колебаний возрастает и, как говорят, «система идет вразнос». После того как самолеты стали иметь довольно большую скорость, некоторые из них при испытаниях буквально разваливались в воздухе из-за флаттера. Реальные видео флаттера можно посмотреть в Интернете: <https://www.youtube.com/watch?v=Om3ZMh6eGSY>. Для устранения этого явления при проектировании самолетов обеспечивают конструкции такую критическую скорость, которая выше критической скорости самолета. Явление резонансных колебаний колес называется шимми и при появлении его транспорт теряет устойчивость.

<https://www.youtube.com/watch?v=3ImoYTzZZ2g>  
[https://www.youtube.com/watch?v=z\\_w\\_kvA0vJE](https://www.youtube.com/watch?v=z_w_kvA0vJE)

Технические применения колебаний весьма разнообразны. Очень широко, в частности, их используют в строительной технике, где уже несколько десятилетий применяется укладка бетона методом вибрирования. В случае применения наружных вибраторов их прикрепляют к опалубке, через которую передаются колебания

бетонной массе. При использовании внутренних вибраторов их медленно погружают в бетонную массу (рисунок 7.8), где они находятся несколько десятков секунд, а затем извлекают оттуда. Как правило, частота колебаний вибраторов составляет 50—100 Гц. При использовании виброметода повышается плотность бетона, что делает его весьма стойким против проникновения вредных примесей.

Полезно знать, что для улучшения свойств многих технологических материалов весьма важно вибрационное измельчение материала. Например, увеличение удельной поверхности цемента позволяет более чем в 2 раза увеличить его предел прочности.

А теперь вспомним еще раз, как происходит скольжение двух тел по поверхностям друг друга. Помня о том, что поверхности тел имеют микронеровности и поэтому при относительном сдвиге осуществляется не только скольжение по контактными площадкам, но и упругое деформирование выступов, пиков (см. рисунок.3.4 и 5.1). Выделим схематически



Рисунок.7.8. Вибрационная укладка бетона и вибратор для полов

только два пика. При попытке сдвинуться в горизонтальном направлении один пик начинает прогибать другой, то есть сначала пытается сгладить дорогу, а потом уже скользить по ней. Ширина пиков мала (порядка сотых долей миллиметра), и в пределах таких микросмещений главную роль играет именно упругое сопротивление, то есть сила должна подчиняться закону Гука, быть пропорциональной смещению. Иначе говоря, при микросмещениях контактирующие поверхности оказываются как бы связанными многочисленными пружинками. Но после того как верхний пик в ходе движения перевалит через нижний (причем оба они сплющиваются), пружинка рвется вплоть до встречи с новым препятствием. Таким образом, после приложения продольной силы, стремящейся сдвинуть два тела, могут возникнуть следующие

четыре основных режима: режим I упругих микросмещений, режим II скольжения по площадкам контактов мягкого поверхностного слоя (окисных пленок), режим III, когда при большей скорости выдавливаемая жидкая смазка создает подъемную силу, нарушающую большую часть прямых контактов и тем самым снижающую силу трения, режим IV, когда прямые контакты вообще исчезают, одно тело “плавает” над другим по смазочному слою и с увеличением скорости возрастает вязкое сопротивление. Заметим, что зона спадания коэффициента трения (зона штрибек-эффекта) обычно очень мала, порядка мм/с. Если же смазка не вводится искусственно, то увеличение трения с ростом скорости почти незаметно и мы возвращаемся к закону Амонтона-Кулона, за исключением зоны очень малых скоростей

Вернемся теперь к эксперименту, показанному на рисунке 4,10. В отличие от прошлого опыта скорость движения ленты будет невысокой и характер движения сильно меняется. Окажется, что само тело не двигается с той же скоростью, а перемещается толчками. Действительно, один конец пружины прикреплен к телу, а второй начинает удаляться. К телу приложена упругая сила пружины, пропорциональная ее растяжению. Вначале эта сила мала и меньше силы упругого сцепления контакта (трения покоя), так что тело стоит на месте, а точнее, испытывает только незаметное микросмещение. При дальнейшем вытягивании сила пружины преодолевает силу контакта и тело начинает скользить по поверхности. Но сила сопротивления скольжению ниже статического трения, и возникает положительная разность сил, разгоняющая тело. Пружина начнет сжиматься, а создаваемая ею упругая сила - уменьшаться, тело тормозится, вновь прилипает к поверхности, и придется затратить еще время, чтобы вновь растянуть пружину для преодоления трения покоя. Таким образом, движение тела оказывается колебательным, в котором периодически сменяются фазы прилипания и скольжения. Такое движение принято называть фрикционными автоколебаниями: фрикционными потому, что они порождены трением (friction), а авто потому, что они не навязаны извне какой-либо внешней колеблющейся силой, а являются внутренним свойством системы.

Фрикционные автоколебания – механические автоколебания, возникающие в системах с нелинейным трением. Автоколебания – незатухающие колебания в диссипативных нелинейных системах, которые поддерживаются за счет внешнего источника энергии. Характерная особенность автоколебаний – отсутствие внешнего периодического воздействия. Схематично автоколебательную систему

можно представить в виде источника энергии, осциллятора с затуханием и обратной связи (нелинейного элемента) (рисунок.7.9).



Рисунок 7.9. – Возникновение фрикционных автоколебаний

Осциллятор сам регулирует поступление энергии от внешнего источника, что отличает автоколебания от вынужденных колебаний, когда внешний источник определяет, когда и сколько

энергии передать осциллятору, задавая тем самым частоту, амплитуду, фазу и форму колебаний. При автоколебаниях,

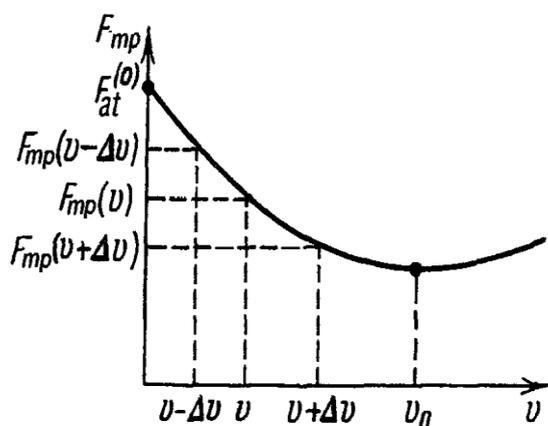


Рисунок 7.10. – К объяснению звучания скрипки и появления скрипа

благодаря наличию нелинейного элемента обеспечивается согласование подачи энергии с работой осциллятора. В системах совершающих фрикционные автоколебания в качестве обратной связи выступает нелинейное трение. Рассмотрим фрикционные автоколебания удобно на примере звучания скрипичной струны.

Качественный вид зависимости силы трения

смычка о струну показан на рисунке 7.10.

Благодаря силе трения покоя струна захватывается смычком и смещается из положения равновесия. Когда сила упругости превысит силу трения, струна оторвется от смычка и устремится к положению равновесия со все возрастающей скоростью.

<https://rabota-02.ru/mobile/video/D0Wy8E2qXL0>

Скорость струны относительно движущегося смычка будет возрастать, сила трения увеличится и в определенный момент станет достаточной для захвата струны. Затем процесс повторится вновь. Таким образом, движущийся с постоянной скоростью смычок вызовет незатухающие колебания струны. Этим же

объясняется и появления скрипа в парах трения, где возникает сухое трение.

Фрикционные автоколебания - крайне неприятный эффект. Для многих машин требуется обеспечить плавное, без толчков, медленное движение. Сварочный робот должен плавно вести сварочный аппарат вдоль свариваемого шва: если он будет дергаться, то в одном месте будет перегрев и свариваемые пластины искорежатся, а в другом сварка не осуществится вовсе, аппарат его проскочит. А ведь робот - это механизм, в узлах которого обязательно возникает трение. Как же преодолевать эти неприятности? На рисованная картина процесса указывает и на два главных пути уменьшения трения: улучшить качество обработки поверхностей, чтобы уменьшить пики, а тем самым величину силы трения покоя (уменьшить область застоя), или обеспечить возможно лучший доступ смазки и сохранность поверхностного слоя. Это самые важные пути, и они предназначены не только для борьбы за плавность хода, но прежде всего для борьбы с ненужными потерями энергии в скользящих контактах. Поиск способов уменьшения трения и эффективных видов смазочных материалов, способов их подвода к скользящим поверхностям занимается армия специалистов.

Рассмотрим один из таких способов.

Начнем с самого простого эксперимента, который можно осуществить, не отходя от стола. Положите сотовый телефон с виброзвонок на стол или книгу, имеющие небольшой наклон. Сила трения покоя надежно удерживает телефон на плоскости и чтобы сдвинуть его нужно приложить значительную силу. Но попытайтесь позвонить на этот телефон. Сработает виброзвонок, и телефон придет в движение, как будто он находится на очень гладкой поверхности. Почему телефон с выключенным виброзвонок находился в покое? Конечно, из-за наличия сухого трения, большой силы трения покоя. Из-за чего же это сцепление уменьшилось? Только из-за того, что переменная скорость вибрации позволила преодолеть барьер трения покоя и привести тела во взаимное движение (<http://www.teoretmeh.ru/film17.htm>).

Главный вывод очень прост, хотя и удивителен: при не слишком больших средних скоростях средняя сила сопротивления ведет себя не как сухое трение, а как вязкое, жидкое, пропорциональное скорости, а при росте амплитуды эта «средняя» вязкость падает. **Приведите примеры, иллюстрирующие это явление.** Такой эффект принято называть вибрационным сглаживанием или ожижением сухого трения под действием высокочастотных вибраций. Он с успехом используется в технике,

в особенности в системах управления, использующих механические устройства. В частности, он позволяет сделать движение робота более плавным, а робот - более послушным даже малым сигналам.

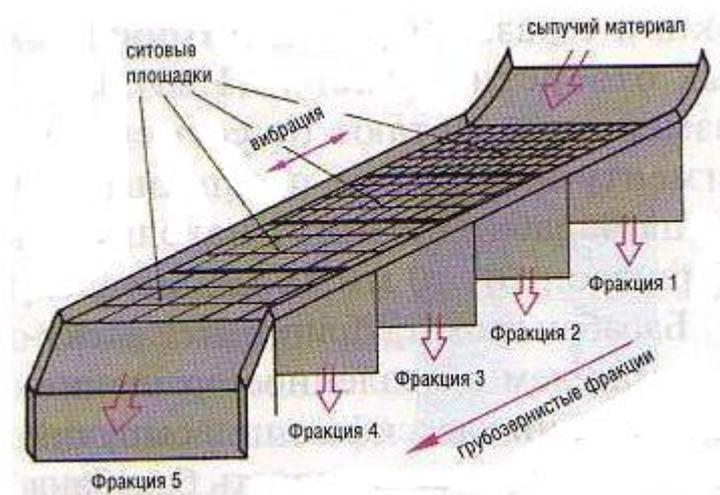


Рисунок 7.11. – Вибрационный стол с делением материала на фракции

Наложение высокочастотных вибраций на сыпучий материал (уголь, зерно, руду и т. п.) превращает его в некоторое подобие жидкостей, так называемый псевдо-сжиженный слой. Такой слой позволяет лучше сжигать уголь, в нем действует закон Архимеда, - тяжелое тонет, а легкое всплывает. Это

позволяет очистить зерно от тяжелых примесей или рассортировать руду по плотностям. Уменьшение силы сопротивления скольжению позволило создать принципиально новый вид транспорта – вибротранспорт, используемые в различных технологических процессах (рисунок 7.11.)

Справедливости ради скажем, что эффект вибрационного сглаживания может проявляться и совсем нежелательным образом, например при транспортировке грузов. [https://www.youtube.com/watch?v=Z\\_OIhxTmrU&list=PLuqQyUIM1MuDOM1MtUE57ONAU12ke8bfK&index=2](https://www.youtube.com/watch?v=Z_OIhxTmrU&list=PLuqQyUIM1MuDOM1MtUE57ONAU12ke8bfK&index=2)

В металлургии вибрирование расплавленного чугуна позволяет удалить вредные газы и шлаки. В этом случае ковш с расплавленным чугуном помещают на специальную виброплатформу, приводимую в колебательное движение с помощью вибраторов. Более легкие примеси, шлаки, а также пузырьки газов при вибрации ускоренно выделяются, что позволяет получить чугун весьма высокого качества.

УЛЬТРАЗВУК это, упругие волны высокой частоты, которым посвящены специальные разделы науки и техники. Человеческое ухо воспринимает распространяющиеся в среде упругие волны частотой приблизительно до 16 000 колебаний в секунду (Гц); колебания с более высокой частотой представляют собой ультразвук (за пределом слышимости). Обычно ультразвуковым диапазоном считают полосу

частот от 20 000 до нескольких миллиардов герц. Хотя о существовании ультразвука ученым было известно давно, практическое использование его в науке, технике и промышленности началось сравнительно недавно. Сейчас ультразвук широко применяется в различных физических и технологических методах. По скорости распространения звука в среде судят о ее физических характеристиках. Измерения скорости на ультразвуковых частотах производятся с очень большой точностью; вследствие этого с весьма малыми погрешностями определяются, например, адиабатические характеристики быстропротекающих процессов, значения удельной теплоемкости газов, упругие постоянные твердых тел.

Применение в биологии и медицине.

То, что ультразвук активно воздействует на биологические объекты (например, убивает бактерии), известно уже более 70 лет. Ультразвуковые стерилизаторы хирургических инструментов применяются в больницах и клиниках. Электронная аппаратура со сканирующим ультразвуковым лучом служит целям обнаружения опухолей в мозгу и постановки диагноза, используется в нейрохирургии для инактивации отдельных участков головного мозга мощным сфокусированным высокочастотным (порядка 1000 кГц) пучком. Но наиболее широко ультразвук применяется в терапии – при лечении люмбаго, миалгии и контузий, хотя до сих пор среди медиков

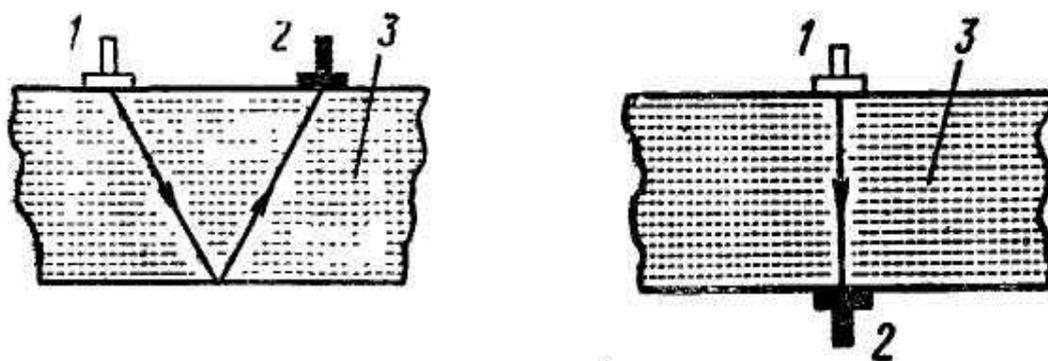


Рисунок 7.12. – Ультразвуковая дефектоскопия . 1- излучатель, 2 – приемник, 3- деталь

нет единого мнения о конкретном механизме воздействия ультразвука на больные органы. Высокочастотные колебания вызывают внутренний разогрев тканей, сопровождаемый, возможно, микромассажем.

**Ультразвуковые методы в промышленности.** Наиболее развитым из существующих ультразвуковых технологических

применений является ультразвуковая дефектоскопия, которая основана на возможности обнаружения дефекта в изделии по значительному изменению акустических свойств в дефектных местах и по возникающим при этом явлениях дифракции, отражения и преломления.

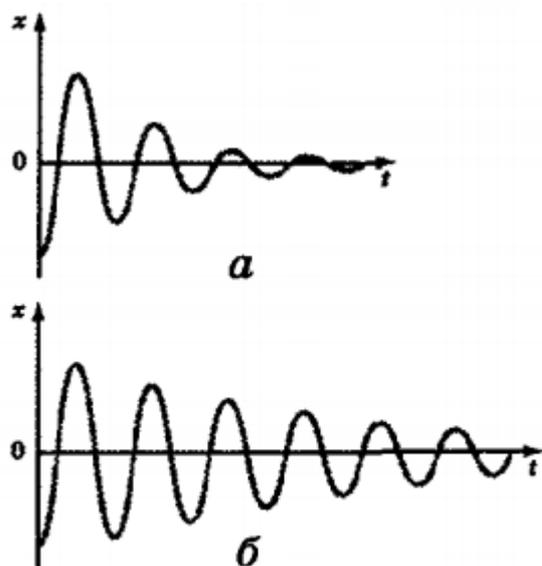


Рисунок 7.14. – Затухающие колебания, а – в среде с большим сопротивлением (масло), б – в среде с малым сопротивлением (воздух)

Ультразвуковая дефектоскопия позволяет исследовать изделия больших размеров (до 5—10 м), что определяется малым затуханием ультразвуковых колебаний в большинстве веществ.

Существует два основных метода ультразвукового контроля. Один из них — эхометод основан на регистрации приемником ультразвуковой волны, отраженной от края исследуемого изделия. Эхометод бывает как непрерывный, так и импульсный, причем

недостатком последнего является то, что его нельзя применять для контроля толстых изделий из-за возникающей мертвой зоны. При втором — теневом методе дефектоскопии излучатель ультразвука располагается с одной стороны исследуемой детали, а приемник ультразвука — с другой. Наибольшее распространение этот метод находит для контроля тонких изделий (труб, листового проката) с толщиной до 50 мм. <https://remoskop.ru/ultrazvukovoj-akusticheskij-defektoskop-shema.html>

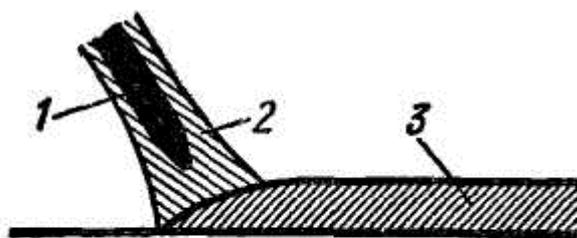


Рис. 7.13. Схема ультразвуковой пайки:

1 — наконечник паяльника; 2 — расплавленный оловянный припой; 3 — затвердевшее олово.

Главным недостатком метода ультразвуковой дефектоскопии является необходимость плотного контакта излучателя и приемника с исследуемым изделием. Если контакт недостаточно плотен из-за наличия на поверхности шероховатостей или неровностей, то (особенно

при теновом методе) возможна ошибка контроля.

Кроме металлургии, где с помощью ультразвуковых методов осуществляется всевозможный контроль изделий, ультразвуковые дефектоскопы широко используются на железнодорожном транспорте (для проверки рельсов). Использование рельсовых дефектоскопов позволяет достаточно надежно определять дефекты железнодорожного полотна и значительно уменьшать вероятность аварии.

**Методы ультразвуковой очистки деталей.** Очищающее действие ультразвуковых колебаний основано на явлении кавитации. Метод ультразвуковой очистки позволяет удалять любые загрязнения: масло, жир, мелкую металлическую стружку, остатки материалов, образовавшихся после шлифования и полирования. Конструкторами были разработаны специальные ванны для ультразвуковой очистки. Транспортёром детали подаются в ванну, где они подвергаются ультразвуковой очистке. Моющая жидкость очищается в отстойнике. Масляные пленки и слабо прилипшие частицы удаляются ультразвуковыми колебаниями высокой частоты (300 кГц). Твердые покрытия (например, лаки) удаляются колебаниями низких частот (25 кГц).

Ультразвуковая пайка. Применение ультразвука позволило решить довольно важную технологическую задачу — соединение алюминия или алюминиевых сплавов. Пайка алюминия методами, применяемыми для других металлов, невозможна, так как на поверхности алюминия, соприкасающейся с кислородом, образуется окисный слой толщиной 0,001 мкм, который не удаляется обычными флюсами.

Используя ультразвук, можно осуществить безукоризненно мягкую пайку алюминия и алюминиевых сплавов. В жидком припое пленка окиси разрушается и расплавленный припой вступает в соприкосновение с неокисленной алюминиевой поверхностью. Наконечник ультразвукового паяльника (рисунок 7.13) не только подогревается, но и совершает колебания с частотой около 20 кГц. Ультразвуковой метод пайки позволяет получать соединения столь высокой прочности, что разрыв образцов (например, спаянной проволоки) происходит не в месте соединения, а где-то в другом месте.

Одним из важнейших применений метода ультразвуковой очистки — предупреждение образования накипи на котлах, используемых в энергетических установках.

Если же вода подвергается ультразвуковой обработке, то вместо твердой накипи образуется хорошо смываемый осадок. Для очистки котла применяют специальный прибор, генерирующий

колебания низкой ультразвуковой частоты, излучатель ультразвуковых волн (магнитострикционный вибратор) и катушка, возбуждающая в нем колебания, встроены в кожух, который имеет резьбу для ввертывания его в котел.

Мощное ультразвуковое излучение находит применение в металлургии для изменения свойств металлов и стекол в расплавленном и кристаллизующемся состояниях, что позволяет создавать материалы с заданными свойствами. Некоторые металлы (например, алюминий и кадмий) при обычных условиях не смешиваются, применение же ультразвука позволяет получить из них сплав.

Если мощным ультразвуком обрабатываются металлы в состоянии кристаллизации, то это приводит к измельчению зерна и структура отливки получается более равномерной

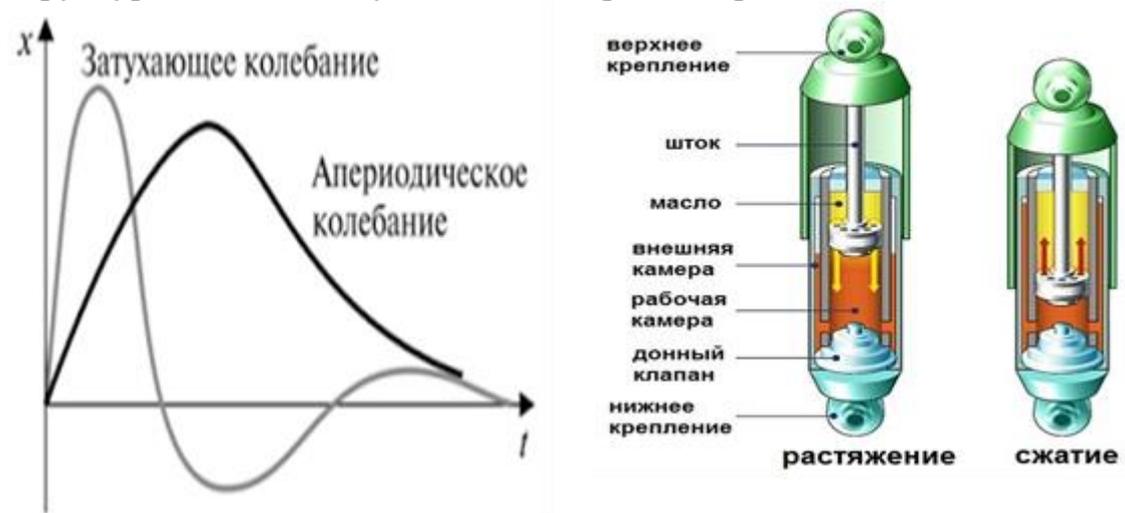


Рисунок 7.15. – Переход от колебательного движения к апериодическому (слева) и амортизаторы в разрезе (справа).

Если трение мало, то оно вызывает затухание колебаний, но не меняет заметно периода колебаний. Если же трение велико, то оно заметно увеличивает как период, так и затухание колебаний (рисунок 7.14). Процесс все больше и больше отличается от периодического, и термин «период» все менее и менее применим к этому процессу. В случае сильно затухающих колебаний уже совершенно условно «периодом» колебаний называют время между двумя последовательными прохождениями тела через нулевое положение или между двумя соседними максимумами. Этот «период» растет с

увеличением коэффициента трения. Если коэффициент трения очень велик, то колеблющееся тело вообще никогда не проходит дважды через нулевое положение, а приближается к нему второй раз только асимптотически (рисунок 7.15, слева); Движение из колебательного

превращается в апериодическое. Переход от колебательного движения к апериодическому происходит в области, где коэффициент трения имеет критическое значение. При дальнейшем увеличении *коэффициента трения (коэффициента сопротивления)* возвращение системы к положению равновесия происходит все медленнее и медленнее.

Это свойство апериодических колебаний широко используется в технике гашения колебаний и демпферировании подвижных систем приборов. В технике, особенно на транспорте, устройства гашения колебаний называются амортизаторами (рисунок 7.15, справа). [https://www.youtube.com/watch?v=VdpZZ\\_50cvg](https://www.youtube.com/watch?v=VdpZZ_50cvg)).

***Опишите работу амортизатора и объясните, куда девается энергия колебательного движения.***

## Тема 8. Силы инерции в технике. Центробежные силы в технике.

В практических целях для описания движения тел часто удобно пользоваться неинерциальными системами отсчета (НИСО). Неинерциальность проявляется в наличии у тел и частиц ускорений, которые не могут быть объяснены реальными силовыми воздействиями со стороны других тел или полей.

В своем изложении мы ограничимся рассмотрением только некоторых из сил инерции, т.к. другие силы подробно были рассмотрены в курсе физики, а другие встречаются редко и в технике не играют большой роли.

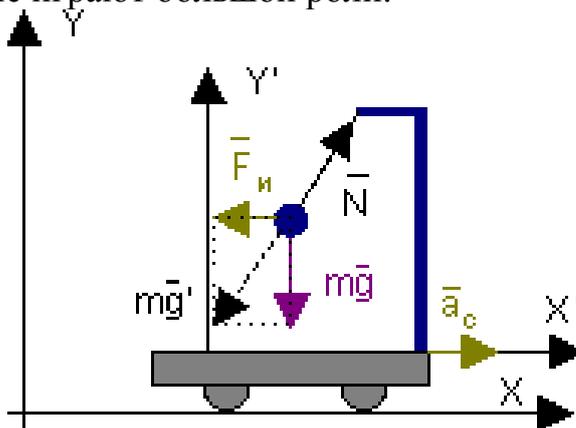


Рисунок 8.1.— Инерциальные и неинерциальные системы отсчета

Выделив жирным шрифтом векторные величины, рассмотрим движение маятника, находящегося в положении равновесия, в неподвижной (инерциальной - ИСО) системе отсчета  $XU$  и в движущейся (неинерциальной- НИСО) системе отсчета  $X^1U^1$  а вдоль оси  $OX$  с ускорением  $a_c$  (см. Рисунок. 8.1). Видно, что в НИСО, связанной с тележкой, второй закон Ньютона не выполняется.

В случае прямолинейного движения тележки шарик движется с ускорением  $a' = a - a_c = -a_c$ , хотя сумма всех сил, действующих на него равняется нулю  $mg + N = 0$ .

Поскольку с точки зрения наблюдателя, находящегося на тележке, шарик движется с ускорением  $a'$ , то можно считать, что на него действует некоторая сила, сообщающая это ускорение. Данную силу назовем силой инерции  $F_i$ .

$$F_i = ma' = -ma_c. \quad (8.1)$$

Сила инерции при поступательном движении НИСО обладает следующими свойствами:

- пропорциональна ускорению;
- пропорциональна массе тела;
- направлена против вектора ускорения.

**Опишите, где Вы встречались с проявлением этой силы?**

С введением силы инерции справедливость второго закона Ньютона в НИСО восстанавливается, а уравнение движения маятника примет следующий имеет вид:

$$m\mathbf{a}' = m\mathbf{g} + \mathbf{N} + \mathbf{F}_и. \quad (8.2)$$

Закон динамики в неинерциальных системах отсчета (НИСО) можно сформулировать в следующем виде:

произведение массы тела на ускорение в НИСО равно векторной сумме всех реальных сил, действующих на тело, и силы инерции.

$$m\mathbf{a}' = S\mathbf{F}_i + \mathbf{F}_и. \quad (8.3)$$

Действительно, согласно 2 закону Ньютона для ИСО, и закону преобразования ускорений имеем:

$$m\mathbf{a} = S\mathbf{F}_i; \quad m(\mathbf{a}' + \mathbf{a}_c) = S\mathbf{F}_i; \quad m\mathbf{a}' = S\mathbf{F}_i - m\mathbf{a}_c = S\mathbf{F}_i + \mathbf{F}_и. \quad (8.4)$$

Знак  $S$  здесь обозначает сумму.

Отметим, что решение многих задач в НИСО существенно упрощается. Задачи динамики удается свести к задачам статики, в которых

$$S\mathbf{F}_i + \mathbf{F}_и = 0. \quad (8.5)$$

Обычно, при движении с постоянной скоростью мы не замечаем сил инерции, поскольку их нет, а проявляют они себя в тех случаях когда происходит движение с ускорением. Значительность этих сил демонстрирует рисунок 8.2, показывающий, что силы инерции могут быть настолько значительными, что легко разрушают автомобиль.

Сравним свойства поля силы инерции в прямолинейно движущихся НИСО со свойствами поля силы тяжести. Данные поля и силы обладают рядом общих черт:

оба поля являются однородными (значение и направление этих сил не зависит от точки пространства НИСО, движущихся поступательно);

обе силы пропорциональны массе тел.

Поле силы инерции эквивалентно однородному полю силы тяжести. Это утверждение представляет собой принцип эквивалентности Эйнштейна.

Из принципа Эйнштейна вытекает эквивалентность инертной и гравитационной масс в ограниченной области пространства. В

ограниченной, поскольку поле гравитационных сил в общем случае не является однородным (сила взаимодействия уменьшается по мере удаления тел друг от друга).

.Наблюдатель, находящийся в НИСО, как будто бы ощущает действие нового поля тяжести, силы которого направлены как вектор  $g'$  (см. рисунок).



Рисунок 8.2. – Силы инерции, возникшие в результате изменения скорости до нуля, разрушили автомобиль.

Однако следует задать вопрос: «Реальны ли силы инерции?» Рассуждая логически, мы приходим к следующему.

Они не являются реальными, так как:

А) не характеризуют какое-то реальное взаимодействие;

Б) не подчиняются третьему закону Ньютона (для них нет противодействующих сил);

В) силы инерции

всегда являются внешними (внутри системы нет тела, которое было бы материальным источником сил инерции).

С другой стороны они являются реальными, поскольку вызывают ускорение и можно предсказать результат физического действия этих сил, например, перемещения тел, изменение траекторий их движения (падение груза с полки при торможении) и т.п.

**Понятие центробежной силы инерции.** Рассмотрим движение шарика, закрепленного на стержне длиной  $r$ , который равномерно вращается вокруг оси, перпендикулярной одному из ее концов (см. Рисунок.). В инерциальной системе отсчета (ИСО)  $XU$  шарик движется с нормальным ускорением  $a_n$ , обусловленным силой упругости стержня  $F_{упр}$ , которая равна центростремительной силе. В НИСО, связанной со стержнем ускорение шарика  $a' = 0$ , а сумма всех сил, действующих на него, по-прежнему обусловленная только силой упругости, не равна нулю (в вертикальном направлении действие сил тяжести и реакции стержня на изгиб скомпенсированы). Второй закон Ньютона не выполняется. Попробуем видоизменить 2 закон Ньютона применительно к НИСО, скомпенсировав сумму реальных сил, действующих на шарик, некоторой фиктивной силой - силой инерции.

$$\sum F_i + (- ma_n) = ma' = 0. \quad (8.6)$$

Назовем слагаемое в скобках силой инерции (центробежной силой инерции  $F_i = F_{цб}$ ). Тогда 2 закон Ньютона в НИСО выполняется:

$$\sum F_i + F_i = ma' = 0. \quad (8.7)$$

Сила любой природы, вызывающая последнее ускорение, называется центростремительной. Она приложена к телу, и, как уже было сказано, направлена к центру окружности. Согласно второму закону Ньютона, центростремительная сила равна

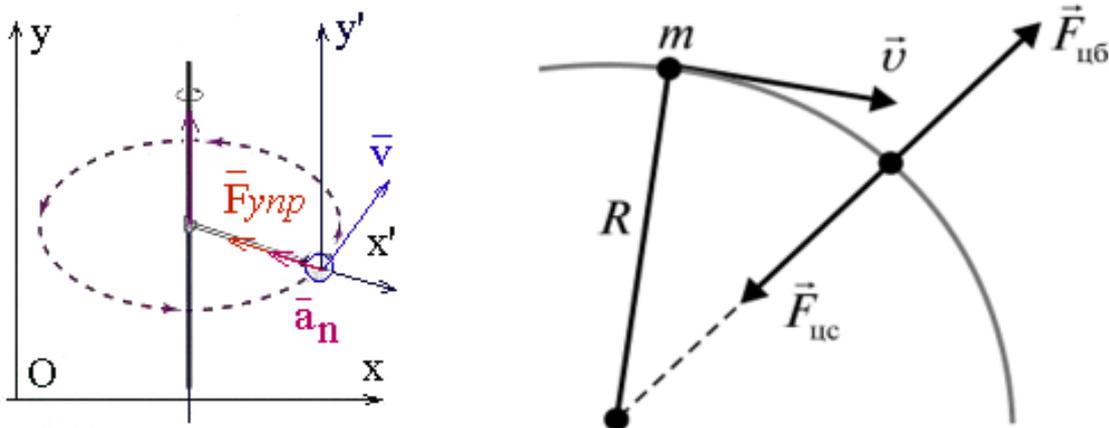


Рисунок.8.3.– Объяснение центробежной силы инерции

$$F_{uc} = ma_{uc} = mv^2 / R = m\omega^2 R \quad (8.8)$$

Центробежная сила инерции приложена к связи и направлена против вектора центростремительного ускорения и равна по величине центростремительной силе:

$$F_{цб} = mv^2/r = m\omega^2 r. \quad \mathbf{F}_{цб} = - m\omega^2 r \mathbf{n}. \quad (8.9)$$

**Если тело покоится относительно равномерно вращающейся системы отсчета, то сумма всех реальных сил и центробежной силы инерции равна нулю.**

**Это утверждение называют принципом Даламбера.**

Центробежная сила инерции не характеризует какого-то реального взаимодействия, а обусловлена вращательным движением системы отсчета. Центробежная сила инерции и сила тяжести эквивалентны в ограниченной области пространства. В ограниченной, т.к. в общем случае центробежная сила инерции растет с увеличением расстояния, а гравитационная - убывает.

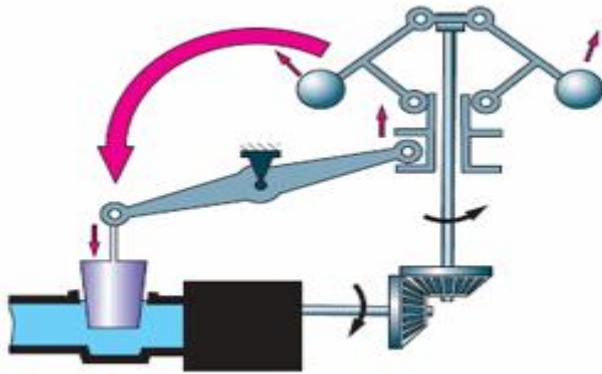


Рисунок.8.4.– Регулятор Уатта.

В технических устройствах наиболее легко реализуемым способом создания движения является круговое движение. В этой связи стоит рассмотреть проявление сил инерции в различных технических устройствах. На действии

центробежной силы основано, например, действие регулятора Уатта, в котором связью грузов с осью вращения служит шарнирно-рычажная система. Цифрой 1 обозначена паровая машина, вращающая некоторый вал, частоту вращения которого надо регулировать.

**Рассмотрите Рисунокунок и опишите принцип действия регулятора Уатта.**

Из формулы видно, что центростремительная и равная ей центробежная силы увеличиваются с увеличением угловой скорости и радиуса вращения. Поскольку силы приложены к разным телам, то в какой - то момент времени центробежная сила инерции может превысить предел прочности связи (прочность веревки, троса, силы вязкости, силу трения и пр.) и связь рвется. Лишенное связи тело движется в направлении действия мгновенного ускорения, т. е. по касательной к окружности. Например, при равномерном движении по окружности на автомобиль (рисунок. 8.5) действует центростремительная сила, роль которой выполняет сила трения. Она приложена к автомобилю и удерживает его на дороге. Центробежная сила инерции действуя на эту связь стремится направить автомобиль по касательной к траектории (т.е к радиусу дороги). И если сила трения окажется небольшой (лед, грязь, вода на дороге) или центробежная сила инерции окажется большой(большая скорость движения автомобиля),



Рисунок.8.5.– Силы, действующие на автомобиль на повороте

то это приведет к тому, что автомобиль окажется в кювете. По касательной к траектории, которая и направлена в кювет.

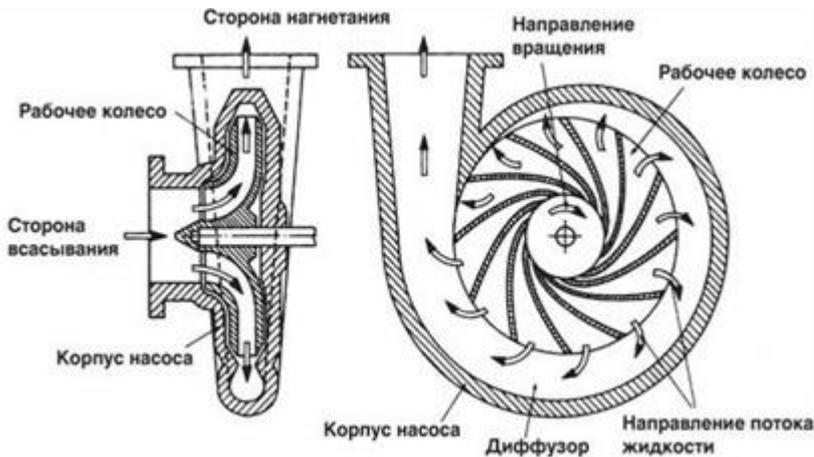


Рисунок 8.6. – Центробежный насос

На разрыве связи основано действие таких механизмов, как, например, сушильная машина, медогонка. В сушильной машинке связью является

сцепление воды с тканью, в медогонке сцепление меда с сотами, в сепараторе-вязкость молока, в центробежном насосе-трение воды (или воздуха) о вращающиеся лопасти насоса, в «Змейке» -трение зерен о винтовые желоба. Широкое применение получили центробежные насосы. Упрощенная схема такого насоса приведена на рисунке 8.6. Жидкость входит по оси цилиндра перпендикулярно плоскости чертежа, а выходит через цилиндрический патрубок, врезанный в кожух

( <https://www.youtube.com/watch?v=rhff-7WIT-M> ).

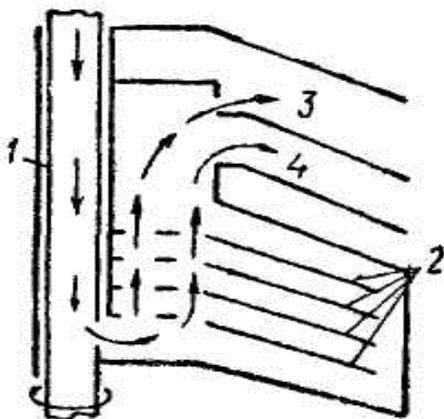


Рис.8.7 Устройство молочного сепаратора:

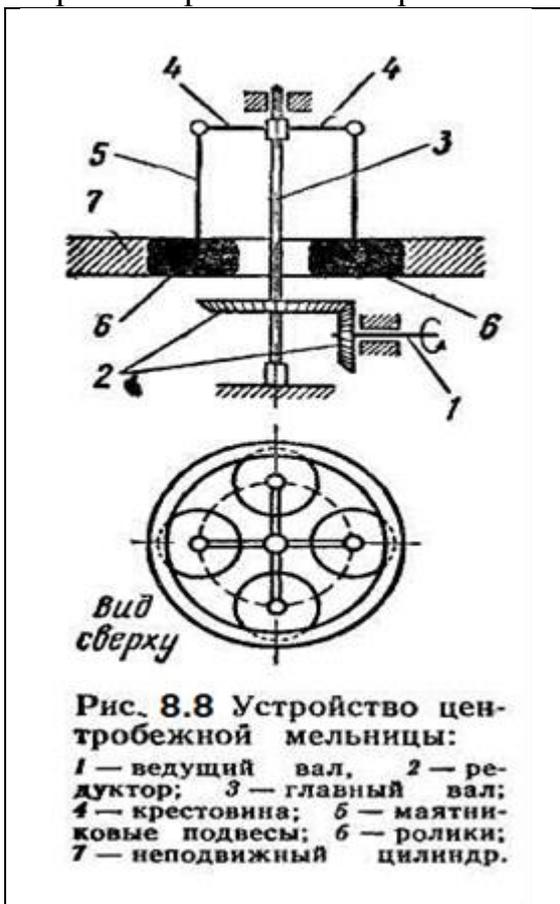
1 — трубка; 2 — тарелки;  
3—4 — отверстия.

тарелки 2, между ними имеется зазор около 0,5 мм. В тарелках

В целом ряде технических устройств применяются центробежные сепараторы, служащие для разделения смесей твердых или жидких тел. Сепараторы, в частности, используются для очистки смазочных масел или для отделения сливок от молока. В качестве примера можно рассмотреть принцип действия молочного сепаратора (рисунок 8.7). Молоко поступает в барабан, вращающийся со скоростью около 10 000 об/мин, по неподвижной трубке 1. В барабане вращаются тарелки 2, между ними имеется зазор около 0,5 мм. В тарелках

сделаны сквозные отверстия, через которые проходит молоко. При вращении барабана менее плотные жировые шарики скапливаются около его оси, а плотная обезжиренная часть (обрат) оттесняется от оси. Жировые шарики сгущаются в сливки, которые выходят из барабана через отверстие 3. Отверстие 4 служит для выхода снятого молока. Сепаратор позволяет разделять до 5000 л молока в час.

Молоко поступает в барабан, вращающийся со скоростью около 10 000 об/мин, по неподвижной трубке 1. В барабане вращаются тарелки 2, между ними имеется зазор около 0,5 мм. В тарелках сделаны сквозные отверстия, через которые проходит молоко. При вращении барабана менее плотные жировые шарики скапливаются около его оси, а плотная обезжиренная часть (обрат) оттесняется от оси. Жировые шарики сгущаются в сливки, которые выходят из барабана через отверстие 3. Отверстие 4 служит для выхода снятого молока.



Сепаратор позволяет разделять до 5000 л молока в час. Отделение сливок в сепараторе обусловлено тем, что частицы жира и обрат имеют различные массы и потому на эти частицы действуют различные центробежные силы. Расслоение молока в сепараторе под действием центробежной силы подобно отстаиванию его в неподвижном сосуде под действием силы тяжести. Только в сепараторе молоко «отстаивается» горизонтальными слоями и очень быстро (так как центробежная сила значительно превышает силу тяжести).

Широкое применение находят сейчас центробежные мельницы — машины, служащие для

измельчения каких-либо твердых тел между внутренней рабочей поверхностью неподвижного кольца и катящимися по ней роликами или шариками. Роликовые мельницы применяются, например, на электростанциях, работающих на угле, для помола топлива. Схема роликовой центробежной мельницы приведена на рисунке 8.8.

Для получения бесшовных труб большого диаметра, например, пластиковых для системы канализации, применяют центробежный способ литья, который сводится к литью

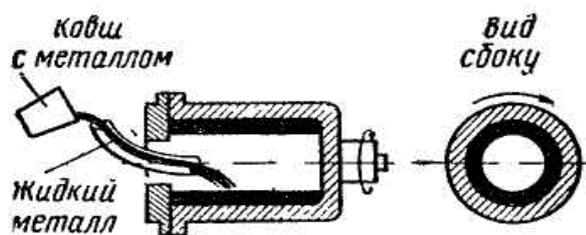


Рис. 8.9. Метод центробежного литья.

В быстровращающейся форме (рисунок 8.9). При горизонтальном способе центробежного литья ось вращения проходит через центр изложницы. Металл, заполняя вращающуюся изложницу, принимает форму цилиндра. Такой способ литья широко применяется, например, для отливки чугунных труб или стволов артиллерийских орудий. Следует отметить, что отливки, выполненные методом центробежного литья, обладают исключительно высокими качествами, так как этот способ гарантирует изготовление отливок с минимальным числом газовых и неметаллических включений.

**Рассмотрите внимательно каждый рисунок и определите направление действия центробежной силы и то, какие силы играют роль связи?**

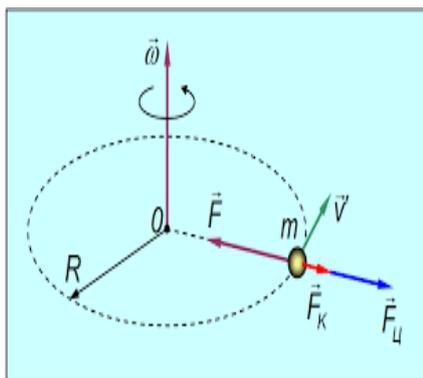
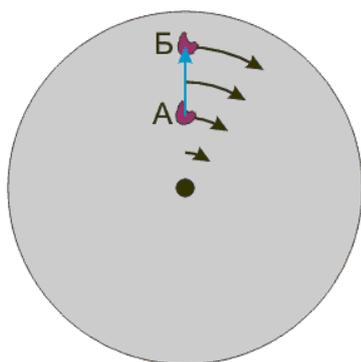


Рисунок 8.10.— Возникновение силы Кариолиса и определение направления ее действия

Понятие силы Кориолиса.

Равномерно вращающийся абсолютно гладкий диск, на котором расположено покоящееся относительно

Земли тело (рисунок 8.10). Трение между телом и диском

отсутствует. Тело покоится относительно Земли и в ИСО, связанной с ней, выполняется 2 закон Ньютона. При вращении диска более далёкие от центра точки движутся с большей касательной скоростью, чем менее далёкие (группа чёрных стрелок вдоль радиуса). Переместить тело вдоль радиуса так, чтобы оно оставалось на радиусе (синяя стрелка из положения «А» в положение «Б») можно, увеличив скорость тела, то есть придав ему ускорение. Если система

отсчета вращается вместе с диском, то видно, что тело «не хочет» оставаться на радиусе, а «пытается» уйти влево— с точки зрения наблюдателя во вращающейся системе отсчёта, это результат действия силы Кориолиса.

При описании движения в НСО ускорение  $\mathbf{a}_k$  можно связать с действием на тело некоторой фиктивной силы, называемой силой Кориолиса  $\mathbf{F}_k$ .

$\mathbf{F}_k = - 2m[\boldsymbol{\omega} * \mathbf{v}']$ . где  $[\boldsymbol{\omega} * \mathbf{v}']$  – векторное произведение, поэтому направление силы Кориолиса определяют по правилу левой руки;  
 $m * \mathbf{a}' = \mathbf{F} + \mathbf{F}_{цб} + \mathbf{F}_k$ .

При стрельбе на очень большие дистанции также необходимо учитывать силу Кориолиса. Поэтому при наличии проекции скорости снаряда на направление "север—юг" будет некоторый снос снаряда в направлении "запад—восток". Этот фактор также учтён в таблицах стрельбы и методиках расчёта поправок.

Силу Кориолиса, являющуюся следствием вращения Земли, можно увидеть, наблюдая, как двигается маятник Фуко.  
<https://www.youtube.com/watch?v=rvLUDwNJ7HU>

Можно увидеть ее проявления и в гораздо больших масштабах.

Сила Кориолиса в Северном полушарии Земли, где мы живем, по отношению к движению направлена в правую сторону. Следствием этого становится то, что под влиянием этой силы подмываются водой и являются более крутыми правые берега рек. Соответственно, в Южном полушарии можно наблюдать противоположную картину. Будь железнодорожные рельсы идеальными, под влиянием силы Кориолиса движение поездов по двухколейной дороге привело бы к более выраженному изнашиванию одного рельса по сравнению с другим. В Южном полушарии сильнее изнашивание левого рельса, в Северном – правого

[https://online.mephi.ru/courses/physics/osnovi\\_mehaniki/data/lecture/8/p3.html](https://online.mephi.ru/courses/physics/osnovi_mehaniki/data/lecture/8/p3.html) .

***Приведите проявления различных сил инерции в быту, природе и в технике.***

**Тема 9 Вращательное движение и его использование в технике. Свободные оси. Устойчивость свободного вращения. Виды неуравновешенности механизмов. Понятие о балансировке.**

Ранее было сказано, что наиболее легко реализуемое движение в технике это вращательное движение. При вращении тела вокруг неподвижной оси эта ось удерживается в неизменном положении подшипниками.

Если твердое тело раскрутить вокруг произвольной оси, жестко связанной с телом, и высвободить ось из подшипников, то ее направление в пространстве, вообще говоря, будет меняться. Для того, чтобы произвольная ось вращения тела сохраняла свое направление неизменным, к ней необходимо приложить определенные силы. Возникающие при этом ситуации показаны на рисунке 9.1. В качестве вращающегося тела здесь использован массивный однородный стержень АВ, прикрепленный к достаточно эластичной оси (изображена двойными штриховыми линиями). Эластичность оси позволяет визуализировать испытываемые ею динамические нагрузки. Во всех случаях ось вращения вертикальна, жестко связана со стержнем и укрепена в подшипниках; стержень раскручен вокруг этой оси и предоставлен сам себе.

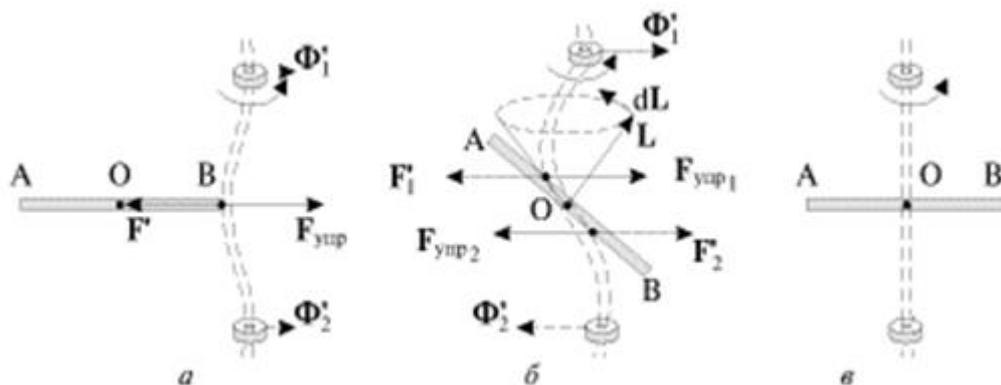


Рисунок 9.1. – Вращение тела на эластичной оси

В случае, изображенном на Рисунок. 10.1 а, ось вращения является для точки В стержня главной, но не центральной,  $\vec{L} \parallel \vec{\omega}$ . Ось изгибается, со стороны оси на стержень действует сила  $\vec{F}_{упр}$ , обеспечивающая его вращение (в НСО, связанной со стержнем, эта сила уравнивает центробежную силу инерции). Со стороны стержня на ось действует сила  $\vec{F}'$ , уравновешенная силами  $\Phi'_1$  и  $\Phi'_2$  со стороны подшипников.

В случае рисунка 9.1 б ось вращения проходит через центр масс стержня и является для него центральной, но не главной. Момент импульса относительно центра масс  $O$  не сохраняется и описывает коническую поверхность. Ось сложным образом деформируется (изламывается), со стороны оси на стержень действуют силы  $F_{упр.1}$  и  $F_{упр.2}$ , момент которых обеспечивает приращение  $dL$ . (В НСО, связанной со стержнем, момент упругих сил компенсирует момент центробежных сил инерции, действующих на одну и другую половины стержня). Со стороны стержня на ось действуют силы  $F'_{1}$  и  $F'_{2}$ , направленные противоположно силам  $F_{упр.1}$  и  $F_{упр.2}$ . Момент сил  $F'_{1}$  и  $F'_{2}$  уравновешен моментом сил  $\Phi'_{1}$  и  $\Phi'_{2}$ , возникающих в подшипниках.

И только в том случае, когда ось вращения совпадает с главной центральной осью инерции тела (рисунок 9.1 в), раскрученный и предоставленный сам себе стержень не оказывает на подшипники никакого воздействия. Такие оси называют свободными осями, потому что, если убрать подшипники, они будут сохранять свое направление в пространстве неизменным. При вращении вокруг любого стержня алгебраическая сумма центробежных сил инерции и их моментов будут равны нулю, так что эти оси являются свободными. А вот любая другая ось уже не будет свободной.

Можно показать, что в каждом теле существует только три взаимно перпендикулярные свободные оси, проходящие через центр масс тела. Их называют главными осями инерции. У однородного прямоугольного параллелепипеда они проходят через центры противоположных граней.

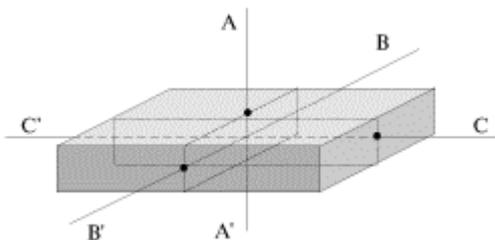


Рисунок 9.2. – Главные центральные оси параллелепипеда

Если тело приведено во вращение вокруг одной из главных осей и внешние воздействия отсутствуют, то направление оси вращения в пространстве должно оставаться неизменным. Однако закрутить тело абсолютно точно вокруг главной оси практически невозможно, к тому же

неизбежные случайные толчки сразу же нарушают это движение. Поэтому длительное вращение вокруг свободной оси можно наблюдать только в том случае, когда при небольших отклонениях от этого движения появляются силы, возвращающие тело к вращению вокруг главной оси.

**Рассмотрите и начертите силы, действующие на подшипники в каждом случае при вертикальном и горизонтальном расположении оси.**

Иное дело, будет ли это вращение устойчивым по отношению к малым возмущениям, всегда имеющим место в реальных условиях. Опыты показывают, что вращение вокруг главных центральных осей с наибольшим и наименьшим моментами инерции является устойчивым, а вращение вокруг оси с промежуточным значением момента инерции - неустойчивым. В этом можно убедиться, подбрасывая вверх тело в виде параллелепипеда, раскрученное вокруг одной из трех взаимно перпендикулярных главных центральных осей (Рисунок. 9.2). Ось  $AA'$  соответствует наибольшему, ось  $BB'$  - среднему, а ось  $CC'$  - наименьшему моменту инерции параллелепипеда.

Если подбросить такое тело, сообщив ему быстрое вращение вокруг оси  $AA'$  или вокруг оси  $CC'$ , можно убедиться в том, что это вращение является вполне устойчивым. Попытки заставить тело вращаться вокруг оси  $BB'$  к успеху не приводят - тело движется сложным образом, кувыркаясь в полете ([https://online.mephi.ru/courses/physics/osnovi\\_mehaniki/data/lecture/7/p4.html](https://online.mephi.ru/courses/physics/osnovi_mehaniki/data/lecture/7/p4.html)).

Наиболее интересно вращение вокруг промежуточной оси инерции проявляется в космическом корабле в состоянии невесомости. Возникает так называемый «эффект Джанибекова» — классический пример вращения абсолютно жесткого тела, закрученного вокруг оси, не совпадающей с осью наименьшего или наибольшего момента инерции.

<https://tjournal.ru/science/118346-effekt-dzhanibekova>

При вращении несбалансированных частей механизмов оси (валы) испытывают определенную динамическую нагрузку, возникают вибрации, тряска, и механизмы могут разрушиться. Причинами возникновения вибраций могут быть периодические изменения сил (силовое возмущение), перемещений (кинематическое возмущение) или инерционных характеристик (параметрическое возмущение). Вибрацией (от лат. vibratio - колебание) называют механические колебания в машинах или механизмах. Если источник возникновения вибраций определяется внутренними свойствами машины или механизма, то говорят о его виброактивности. Чтобы вибрации механизма не распространялись на окружающие его системы или чтобы защитить механизм от вибраций, воздействующих на него со стороны внешних систем, применяются

различные методы виброзащиты. Различают внешнюю и внутреннюю виброактивность. Под внутренней виброактивностью понимают колебания возникающие внутри механизма или машины, которые происходят по его подвижностям или обобщенным координатам. Эти колебания не оказывают непосредственного влияния на окружающую среду. При внешней виброактивности изменение положения механизма приводит к изменению реакций в опорах (т.е. связях механизма с окружающей средой) и непосредственному вибрационному воздействию на связанные с ним системы.

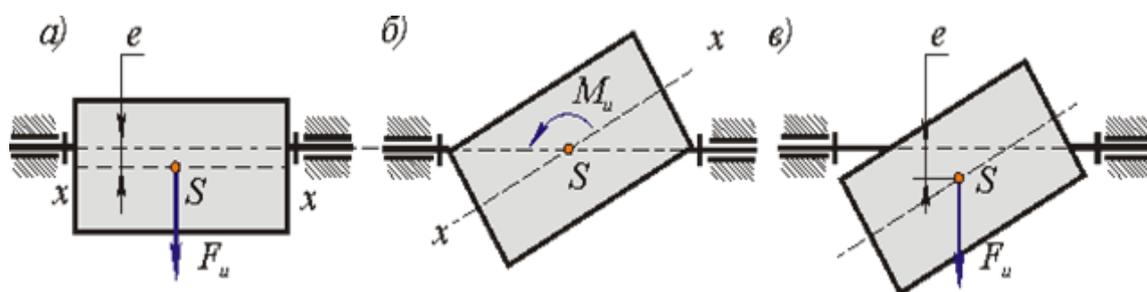


Рисунок 9.3.– Виды неуравновешенности роторов

Одна из основных причин внешней виброактивности - неуравновешенность его звеньев и механизма в целом. Чтобы нагрузки на подшипники были минимальными, нужно, как мы видели, возможно точнее совместить ось вращения со свободной осью тела. Однако абсолютно точно сделать это нельзя. Поэтому в машинах с большой частотой вращения применяются гибкие, или самоцентрирующиеся, валы. В нормальном режиме они изгибаются так, чтобы вращение происходило как раз вокруг свободной оси. <https://www.youtube.com/watch?v=OK04uwtTfX8>

Ротором называют звенья механизмов, совершающие вращательное движение и удерживаемые при этом своими несущими поверхностями в опорах. Если масса ротора распределена относительно оси вращения равномерно, то главная центральная ось инерции  $x-x$  совпадает с осью вращения и ротор является уравновешенным или идеальным. При несовпадении оси вращения с осью  $x-x$ , ротор будет неуравновешенным и в его опорах при вращении возникнут переменные реакции, вызванные действием инерционных сил и моментов (точнее, движением центра масс с ускорением).

В зависимости от взаимного расположения оси вращения и главной центральной оси инерции  $x-x$ , по ГОСТ 19534-74, различают следующие виды неуравновешенности роторов (рисунок 9.3.): а - статическую, когда эти оси параллельны; б - моментную, когда оси

пересекаются в центре масс ротора  $S$ ; в - динамическую, когда оси либо пересекаются вне центра масс, либо не пересекаются, а перекрещиваются в пространстве.

На практике балансировку проводят: при конструировании - расчетными методами, в процессе изготовления деталей и узлов - экспериментально на специальных балансировочных станках. Балансировка на станках является более точным и надежным методом, по сравнению с расчетными. Поэтому она применяется для ответственных деталей с высокими рабочими частотами вращения. Корректировка масс ротора осуществляется либо присоединением к нему дополнительных корректирующих масс (наплавлением, наваркой или привинчиванием противовесов), либо удалением части массы ротора с "тяжелой" стороны (фрезерованием или высверливанием).

Точность балансировки характеризуется величиной остаточного дисбаланса  $D_0$  ротора в каждой из плоскостей коррекции. Величина  $D_0$  не должна превышать допустимых для данного класса точности значений, регламентируемых ГОСТ 22061-76.

Рассмотрим каждую из этих неуравновешенностей отдельно и определим способы балансировки.

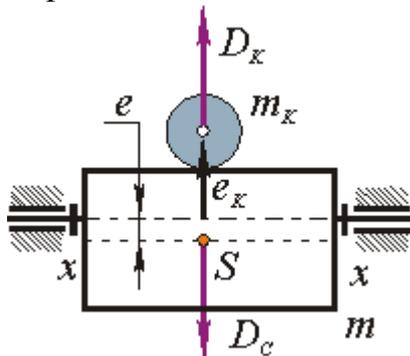


Рисунок 9.4. – Устранение статической неуравновешенности

При статической неуравновешенности (рисунок 9.4) главная центральная ось инерции параллельна оси вращения ротора, главный вектор дисбалансов больше нуля, а главный момент дисбалансов равен нулю

$$D_c \neq 0; M_D = 0, \quad (9.1)$$

т.е. необходимо уравновесить только вектор  $D_c = m e$ . Для этого достаточно установить на роторе только одну корректирующую массу  $m_k$  величине которой определяется из равенства

$$D_k = m_k e_k = -D_c m_k = D_c / e_k, \quad (9.2)$$

где величиной  $e_k$  задаются из соображений удобства размещения противовесов. Направление вектора  $D_k$  противоположно направлению  $D_c$ . Условие статической уравновешенности ротора:

$$\sum_{i=1}^n D_i = 0 \quad (9.3)$$

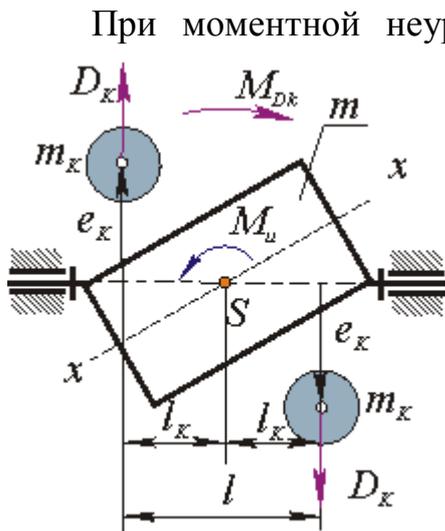


Рисунок 9.5. – Устранение моментной неуравновешенности

При моментной неуравновешенности (рисунок 9.5) главная центральная ось инерции пересекает ось вращения в центре масс ротора точке  $S$ , главный вектор дисбалансов  $D_c$  равен нулю, главный момент дисбалансов  $M_D$  не равен нулю т.е. необходимо уравновесить только момент дисбалансов  $M_D$ . Для этого достаточно разместить на роторе две одинаковых корректирующих массы  $m_k$  на равных расстояниях от оси вращения  $e_k$  и от центра масс  $S - l_k$ . Массы выбираются и размещаются так, чтобы момент их дисбалансов  $M_{Dk}$  был по величине равен, а по направлению

противоположен моменту дисбалансов ротора  $M_D$ :

$$M_{DR} = -M_D,$$

$$M_{DR} = D_k \cdot l_k + D_k \cdot l_k = M_{Dk1} + M_{Dk2}, \quad (9.4)$$

где  $D_k = m_k e_k$ . В этих зависимостях величинами  $l_k$  и  $e_k$  задаются по условиям удобства размещения противовесов на роторе, а величину  $m_k$  рассчитывают. Необходимо отметить, что величины  $D_k$  в плоскостях коррекции необязательно должны быть равными, необходимо выполнять только неизменность положения центра масс - он должен оставаться на оси вращения. **Условие моментной неуравновешенности**

$$\sum_{i=1}^n M_{Di} = 0 \quad (9.5)$$

При динамической неуравновешенности (рисунок 9.6.) главная центральная ось инерции пересекает ось вращения не в центре масс ротора точке  $S$ , либо перекрещивается с ней; и главный вектор дисбалансов  $D_c$ , и главный момент дисбалансов  $M_D$  не равны нулю т.е. необходимо уравновесить вектор  $D_c$  и момент дисбалансов  $M_D$ . Для этого достаточно разместить на роторе две корректирующих массы  $m_{k1}$  и  $m_{k2}$  на расстояниях от оси вращения  $e_{k1}$  и  $e_{k2}$ , а от центра масс  $S$ , соответственно  $h_{k1}$  и  $h_{k2}$ . Массы выбираются и

размещаются так, чтобы момент их дисбалансов  $M_{Dk}$  был по величине равен, а по направлению противоположен моменту дисбалансов ротора  $M_D$ :

$$M_{Dk} = -M_D, \quad M_{Dk} = D_{k1} \cdot l_{k1} + D_{k2} \cdot l_{k2} = M_{Dk1} + M_{Dk2},$$

где  $D_{k1} = m_{k1} \cdot e_{k1}$  и  $D_{k2} = m_{k2} \cdot e_{k2}$ ,

(9.6)

где  $D_c = -D_k = -(D_{k1} + D_{k2})$ .

а векторная сумма дисбалансов была равна и противоположно направлена вектору  $D_c$ :

В этих зависимостях величинами  $l_{ki}$  и  $e_{ki}$  задаются по условиям удобства размещения противовесов на роторе, а величины  $m_{ki}$  рассчитывают.

**Условие динамической уравновешенности ротора:**

$$\sum_{i=1}^n M_{Dk_i} = 0 \quad \sum_{i=1}^n D_{k_i} = 0$$

**Балансировочный станок,** балансировочная машина, машина для установления места и значения (степени) статической или динамической неуравновешенности

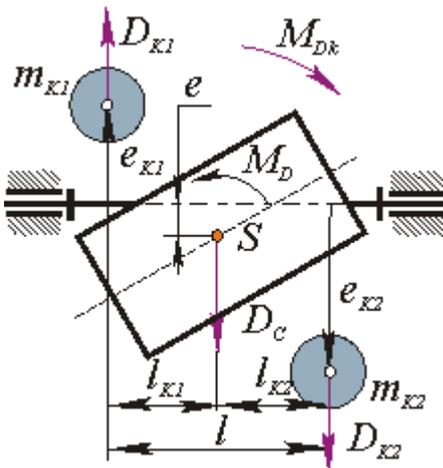


Рисунок 9.6.—Устранение динамической неуравновешенности ротора.

вращающихся частей машин — роторов электрических машин и турбин, валов, шкивов и др. Балансировочный станок обычно состоит из опор, в которые помещается балансируемое изделие (например, ротор), привода для его вращения и измерительного устройства с показывающими приборами (<https://www.youtube.com/watch?v=v62bBJHtcw>).

Различают балансировочный станок с податливыми и жесткими опорами. Податливые опоры под воздействием неуравновешенного вращающегося изделия (ротора) совершают колебания. Амплитуды и фазы колебаний опор и являются

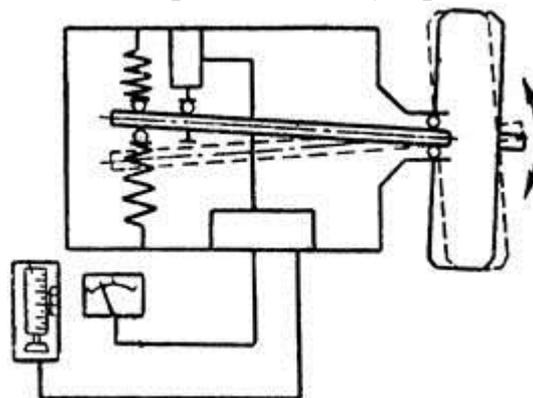


Рисунок 9.7. – Схема балансировочного станка

информацией о неуравновешенности. Жёсткие опоры препятствуют колебанию ротора и вследствие этого испытывают давление. В этом случае для получения информации о неуравновешенности измеряют

давление ротора на опоры и его фазу. Опоры балансировочного станка снабжены датчиками, преобразующими их колебания (или давление от центробежных сил) в электрические сигналы. Электрические сигналы датчиков поступают в измерительное устройство. Структура измерительного устройства и форма информации о неуравновешенности зависят от назначения балансировочного станка

На рисунке 9.7 показана схема балансировочного станка для динамической балансировки с ваттметровым измерительным устройством.

О неуравновешенности роторов можно посмотреть видео в Интернете: <https://www.youtube.com/watch?v=oIPO3sdvfo0> .

***Как по поведению транспортного средства или детали можно определить, что в системе существует дисбаланс?***



Рисунок 9.8.– Балансировочный станок для балансировки колес автомобилей.

Неуравновешенность измеряют сначала в одной плоскости, затем посредством переключений — в другой. В балансировочных станках применяют привод от двухшарнирного вала, от накидного ремня, воздушной струей и т. п.

Исправление неуравновешенности, т. е. установка грузов или съём материала (сверление, фрезерование и т. п.), выполняют вручную на балансировочном станке или вне его

***Попробуйте описать принцип***

***работы этого станка.***

Существуют балансировочные станки: для статической и динамической балансировки; с горизонтальной и вертикальной осью вращения. Балансировочные станки изготавливают с разной степенью автоматизации, например автоматы, включающие устройства для установления размера и места неуравновешенности, устройства для

устранения неуравновешенности и (при необходимости) устройства для повторного контроля. В отдельных случаях для балансировки сложных деталей, например, коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания, используют специальную автоматическую линию. На фотографии показан балансировочный станок, применяющийся для балансировки шин автотранспортных средств. Дисбаланс шин отрицательно влияет как на управляемость колес и долговечность их эксплуатации.

Данный станок, как и другие станки подобной конструкции, автоматически измеряют величину статической и динамической неуравновешенности, а также определяют величину и место закрепления дополнительного груза, который нужно установить на обод колеса для ликвидации неуравновешенности.

**Тема 10. Гидростатика. Плавание тел. Дымовые трубы.  
Гидравлические и пневматические машины. Гидродинамика.  
Уравнение Бернулли и его использование в технике. Инжектор и  
карбюратор. Аэродинамическое сопротивление.**

Задумывались ли вы о том, почему воздушные, морские и речные, надводные и подводные транспортные средства называются одинаково – судами. Что объединяет эти, казалось бы, совершенно разные устройства для передвижения в различных средах? А объединяет их физика. Дело в том, что все они в своем существовании подчиняются одним физическим законам, изучаемым разделами физики – гидроаэростатикой и гидроаэродинамикой. В своем изучении мы не будем разграничивать в какой среде мы рассматриваем действие того или иного закона, но будем всегда иметь в виду, что эти законы одинаковы для жидкостей и для газов.

Физическая величина, определяемая нормальной силой, действующей со стороны жидкости на единицу площади, называется давлением  $p$  жидкости:  $p = \Delta F / \Delta S$ .

Давление при равновесии жидкостей (газов) подчиняется закону Паскаля: давление в любом месте покоящейся жидкости одинаково по всем направлениям, причем давление одинаково передается по всему объему, занятому покоящейся жидкостью.

Давление столба жидкости высотой  $h$  равно  $p = \rho gh$ . Давление  $\rho gh$  называется гидростатическим давлением.

Согласно формуле гидростатического давления, сила давления на нижние слои жидкости будет больше, чем на верхние. Поэтому на тело, погруженное в жидкость, действует выталкивающая сила, определяемая законом Архимеда: на тело, погруженное в жидкость (газ), действует со стороны этой жидкости направленная вверх выталкивающая сила, равная весу вытесненной телом жидкости (газа):

$$F_A = \rho g V, \quad (10.1)$$

где  $\rho$  — плотность жидкости,  $V$  — объем погруженного в жидкость тела.

Следовательно, если вес целиком погруженного в жидкость тела больше выталкивающей архимедовой силы, тело утонет, если меньше — будет всплывать. Выходя постепенно из жидкости, всплывающее тело вытесняет все меньше и меньше жидкости, и поэтому выталкивающая сила уменьшается. Когда ее величина сравняется с весом тела, наступает равновесие сил. В этом заключается условие плавания тела: вес тела, плавающего на поверхности жидкости, равен весу

жидкости, вытесненной погруженной частью этого тела. Однако простое плавание тел и мореходные качества или воздухоплавательные подчиняются Закону Архимеда, но имеют особенности.

Наибольшая допускаемая глубина погружения судна в воду (осадка) отмечается на его корпусе красной линией, которая называется ватерлинией. Вес вытесняемой судном воды при его погружении до

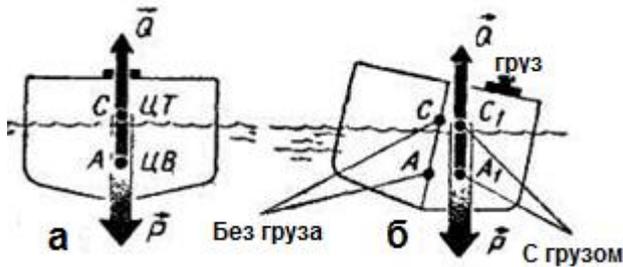


Рисунок 10.1.— Объяснение плавучести судна

ватерлинии, равный весу судна со всем грузом, называется водоизмещением судна. Вычисление архимедовой силы является наиболее важной частью всех расчетов, которые производятся при

конструировании подводных и надводных судов.

Плавучесть — это способность судна держаться на воде со всеми находящимися на нем грузами. Чем больше объем подводной части судна, тем больше действующая на него выталкивающая сила (архимедова сила) и тем больше его плавучесть. Сила тяжести тела  $P$ , плавающего на поверхности воды, приложена к его центру тяжести  $C$  (рисунок 10.1, а).

Архимедова сила  $Q$ , называемая силой поддержания, приложена к точке  $A$ , совпадающей с центром тяжести вытесняемой воды. Точка  $A$  называется центром величины. Когда судно находится в равновесии, центр его тяжести  $C$  и центр величины  $A$

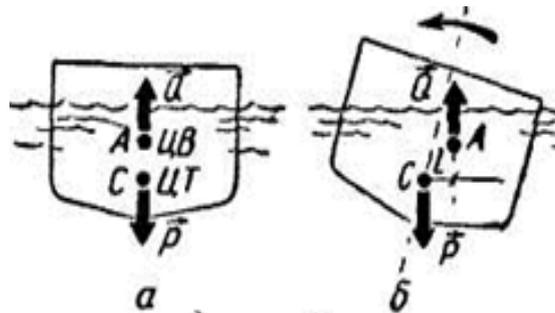


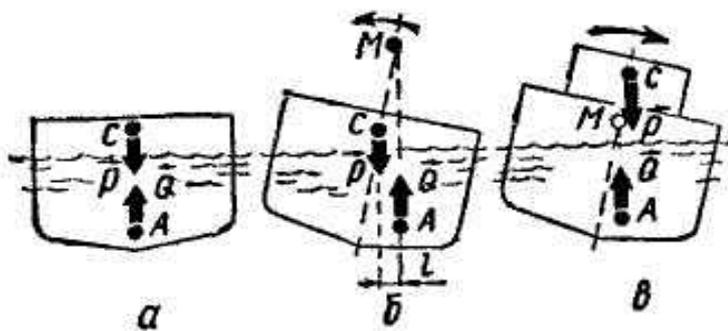
Рисунок 10.2 – Судно с высокой остойчивостью

расположены на одной общей вертикали. Если на таком судне сместить центр тяжести в горизонтальном направлении, переместив, например некий груз, то судно наклонится в сторону этого смещения. В этом случае форма подводного объема изменится, поэтому центр величины  $A_1$  тоже будет смещаться, пока не окажется на одной вертикали с центром тяжести  $C_1$  (рисунок 10.1, б).

Под действием волн или ветра судно может наклониться, даже если его центр тяжести не меняет своего положения относительно

судна. Поэтому каждое судно должно обладать остойчивостью, т. е. способностью не опрокидываться и возвращаться в положение равновесия, после того как силы, наклонившие его, исчезли. Высокой остойчивостью обладают суда, у которых центр тяжести  $C$  лежит ниже центра величины  $A$  (рисунок 10.2, а). При крене судна, например, вправо левый борт частично выходит из воды. От этого центр величины смещается вправо и появляется возвращающий момент  $M = P l$  (рисунок. 10.2, б), под действием которого судно выпрямляется.

У большинства судов центр тяжести  $C$  расположен выше центра величины  $A$  (рисунок. 10.3, а). Они тоже обладают остойчивостью, зависящей от положения метacentра. Так называют точку  $M$



(рисунок.10.3, б), в которой ось симметрии поперечного сечения судна пересекается с вертикалью, проходящей через центр величины  $A$ . Расстояние  $MC$  называют метacentрической высотой.

Рисунок 10.3. – Остойчивость и метacentрическая высота

Если метacentр  $M$

расположен выше центра тяжести  $C$ , то корабль остойчив: при крене появляется возвращающий момент  $M = P l$  (рисунок 10.3, б). При увеличении метacentрической высоты  $MC$  растут и возвращающий момент  $M$  и остойчивость корабля. Если  $M$  лежит ниже  $C$ — корабль нестойчив: при крене момент  $M$  стремится еще больше наклонить и опрокинуть его (рисунок 10.3, в)

(<https://kipmu.ru/pochemu-korabli-ne-tonut/>).

Подводные лодки так же обладают плавучестью, обусловленной тем, что средняя плотность подводной лодки равна средней плотности воды. Увеличивая или уменьшая собственную массу путем закачивания воды в балластные цистерны, лодка изменяет и плотность. А поскольку плотность воды растет с глубиной, хоть и не значительно, то и подводная лодка изменяет глубину погружения. Остойчивость подводной лодки будет так же зависеть от высоты нахождения на оси симметрии лодки центра тяжести ц.т (рисунок 10.4.) и центра давления ц.д.- т.е. центра величины. В отличии от надводных кораблей подводная лодка обладает остойчивостью тогда, когда центр тяжести находится ниже центра давления или центра величины (рисунок 10.4.а)

При наклоне, например вправо центр тяжести и центр давления действуют как пара сил, восстанавливая положение подводной лодки

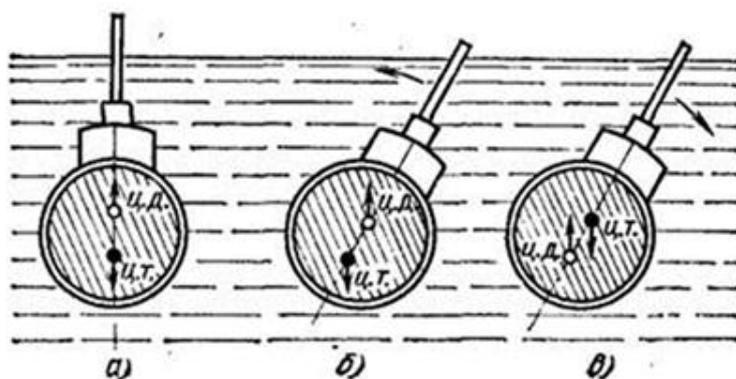


Рисунок.10.4 – Остойчивость подводной лодки.

(рисунок.10.4 б). В противном случае лодка опрокинется до того момента, пока центр тяжести не окажется ниже центра давления (рисунок.10.4.в). Положительной остойчивости

подводной лодки добиваются ее конструкцией.

Благодаря действию сил Архимеда осуществляются полеты воздушных шаров и аэростатов, а также плавание подводных кораблей.

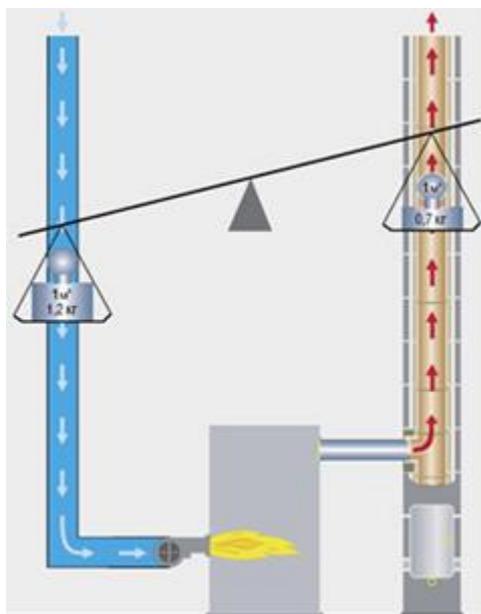


Рисунок 10.5.– Образование тяги в печи

Из-за теплоты, выделяющейся в процессе горения топлива, дымовые газы имеют более высокую температуру, чем атмосферный воздух. В дымовой трубе и восходящих частях соединительных элементов возникает подъёмная сила, которая способствует движению дымовых газов и создаёт в дымовой трубе, соединительных элементах, а также в большинстве случаев в самом котле и в том помещении, где она установлена, разрежение. (рисунок 10.5.)

Горелки, котлы и дымовые трубы связаны друг с другом системами подачи приточного воздуха и удаления дымовых газов. Приточный воздух забирается из атмосферы и вместе с топливом подаётся в топку для сжигания. Образовавшиеся при сжигании топлива дымовые газы отдают свою теплоту, а затем через соединительные элементы и дымовую трубу выбрасываются в атмосферу

(<https://www.youtube.com/watch?v=tRgZE8K-8S0> .

**Рассмотрите дымоходную систему и определите силы, действующие в ней. Будет ли тяга в дымоходе, если температура печи окажется ниже уличной температуры? Объясните.**

Законы гидростатики используются при получении значительных сил, используя малые силы. Например, в гидравлических домкратах, прессах, гидравлических системах машин. **Опишите, принцип работы гидравлического домкрата, знакомый Вам из курса физики средней школы.**

Движение жидкостей или газов представляет собой сложное явление. Для его описания используются различные упрощающие предположения (модели). В простейшей модели жидкость (или газ) предполагаются несжимаемыми и идеальными (то есть без внутреннего трения между движущимися слоями). При движении идеальной жидкости не происходит превращения механической энергии во внутреннюю, поэтому выполняется закон сохранения механической энергии. Следствием этого закона для стационарного потока идеальной и несжимаемой жидкости является уравнение Бернулли (1738 г.). Стационарным принято называть такой поток жидкости, в котором не образуются вихри. В стационарном потоке частицы жидкости перемещаются по неизменным во времени траекториям, которые называются линиями тока, которые проводятся так, что касательные к ним совпадают по направлению с вектором скорости жидкости в соответствующих точках пространства.

**Гидроаэромеханика** — раздел механики, изучающий равновесие и движение жидкостей и газов, их взаимодействие между собой и обтекаемыми ими твердыми телами,— использует единый подход к изучению жидкостей и газов.

**Сплошная среда** – это среда, непрерывно распределенная в занятой ей части пространства.

**Несжимаемая жидкость** — жидкость, плотность которой всюду одинакова и не изменяется со временем.

Опыт показывает, что стационарные потоки возникают только при достаточно малых скоростях движения жидкости.

Рассмотрим стационарное движение идеальной несжимаемой жидкости по трубе переменного сечения (рисунок 10.6). Различные части трубы могут находиться на разных высотах. Течение идеальной жидкости по трубе переменного сечения.

$$\Delta V_1 = l_1 S_1; \Delta V_2 = l_2 S_2 \quad (10.2)$$

. Условие несжимаемости:

$$\Delta V_1 = \Delta V_2 = \Delta V. \quad (10.3)$$

За промежуток времени  $\Delta t$  жидкость в трубе сечением  $S_1$  переместится на  $l_1 = v_1 \Delta t$ , а в трубе сечением  $S_2$  – на  $l_2 = v_2 \Delta t$ , где  $v_1$  и  $v_2$  – скорости частиц жидкости в трубах. Условие несжимаемости записывается в виде:

$$\Delta V = l_1 S_1 = l_2 S_2 \text{ или } v_1 S_1 = v_2 S_2. \quad (10.4)$$

Здесь  $\Delta V$  – объем жидкости, протекшей через сечения  $S_1$  и  $S_2$ .

Соотношение  $S_1 v_1 = S_2 v_2 = \text{const}$  называется **уравнением**

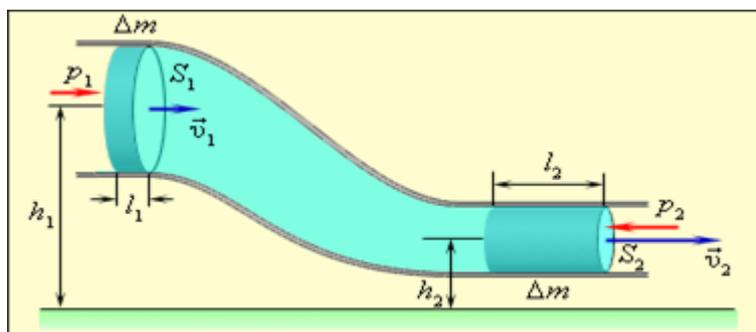


Рисунок.10.6.– К уравнению неразрывности

**неразрывности** для несжимаемой жидкости. Таким образом, при переходе жидкости с участка трубы с большим сечением на участок с меньшим сечением скорость течения возрастает, то есть жидкость

движется с ускорением. Следовательно, на жидкость действует сила. В горизонтальной трубе эта сила может возникнуть только из-за разности давлений в широком и узком участках трубы. Давление в широком участке трубы должно быть больше чем в узком участке. Если участки трубы расположены на разной высоте, то ускорение жидкости вызывается совместным действием силы тяжести и силы давления. Сила давления – это упругая сила сжатия жидкости. Несжимаемость жидкости означает лишь то, что появление упругих сил происходит при пренебрежимо малом изменении объема любой части жидкости.

Так как жидкость предполагается идеальной, она течет по трубе без трения. Поэтому к ее течению можно применить закон сохранения механической энергии.

$$\text{Выражение } \frac{\rho \cdot v^2}{2} + \rho gh + p = \text{const} \quad (10.5)$$

получено швейцарским физиком Д. Бернулли и называется **уравнением Бернулли**. Уравнение Бернулли — выражение закона сохранения энергии применительно к установившемуся течению идеальной жидкости. Оно хорошо выполняется и для реальных жидкостей, внутреннее трение которых не очень велико (<https://www.youtube.com/watch?v=Qdr6pyQELz4> ).

Величина  $p$  в уравнении Бернулли называется **статическим давлением** (давление жидкости на поверхность обтекаемого ею тела), величина  $\rho v^2/2$  — **динамическим давлением**, величина  $\rho gh$  представляет собой **гидростатическое давление**.

Для горизонтальной трубки тока ( $h_1=h_2$ )

$$\frac{\rho v^2}{2} + p = const, \text{ где } \left( \frac{\rho \cdot v^2}{2} + p \right) \quad (10.6)$$

называется **полным давлением**.

Измерим давления в потоке жидкости с помощью манометров. Так как  $v_1 < v_2 < v_3$ , то  $h_1 > h_2 > h_3$ , то есть чем выше скорость движения жидкости, тем меньше давление в потоке.

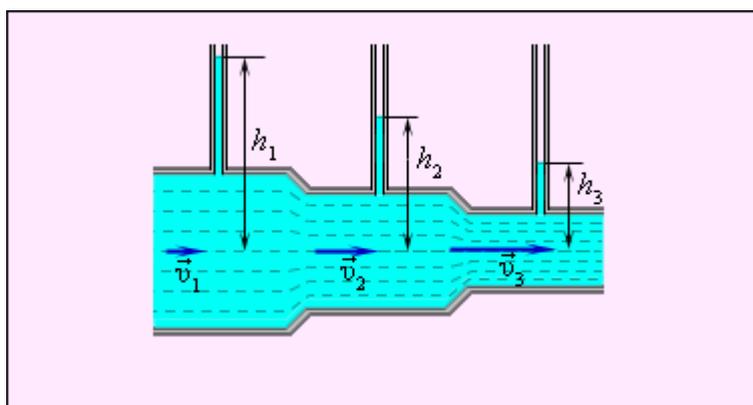


Рисунок 10.7. – Измерение давления в потоке

Величина  $p$  — статическое давление в жидкости. Оно может быть измерено с помощью манометра, перемещающегося вместе с жидкостью.

Практически давление в разных сечениях трубы

измеряется с помощью манометрических трубок, вставленных через боковые стенки в поток жидкости, так чтобы нижние концы трубок были перпендикулярны скоростям частиц жидкости (рисунок.10.7.) (<https://www.youtube.com/watch?v=31CoWrbXdps> ).

Если сечение потока жидкости достаточно велико, то уравнение Бернулли следует применять к **линиям тока**, то есть линиям, вдоль которых перемещаются частицы жидкости при стационарном течении. Например, при истечении идеальной несжимаемой жидкости из отверстия в боковой стенке или дне широкого сосуда линии тока начинаются вблизи свободной поверхности жидкости и проходят через отверстие (Рисунок. б).

Истечение жидкости из широкого сосуда.

Поскольку скорость жидкости вблизи поверхности в широком сосуде пренебрежимо мала, то уравнение Бернулли принимает вид:

$$\rho v^2 / 2 + p_0 = \rho gh + p_0 \quad (10.7)$$

где  $p_0$  — атмосферное давление,  $h$  — перепад высоты вдоль линии тока. Таким образом,

$$v = \sqrt{2gh} \quad (10.8)$$

Это выражение для скорости истечения называют формулой Торричелли. Скорость истечения идеальной жидкости из отверстия в сосуде такая же, как и при свободном падении тела с высоты  $h$  без начальной скорости.

Однако если сравнивать теоретический расход, исчисленный по формуле Торричелли, и реальный расход жидкости через отверстия и насадки, то получится явное противоречие. Практический расход жидкости окажется меньше теоретического на некоторую величину, называемую коэффициентом расхода. Эта разница объясняется тем, что реальная жидкость имеет вязкость и массу и не может мгновенно изменить направление своего движения. Из-за этого образуется сжатие струи. **Сделайте соответствующий рисунок и покажите причину сжатия.** Следовательно, изменяя форму и диаметр

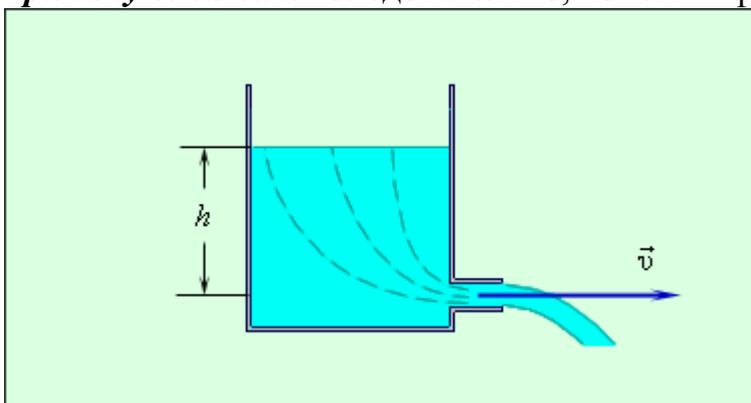


Рисунок.10.8. – Истечение жидкости из широкого сосуда

отверстий и насадок можно управлять расходом жидкости. В технике такие устройства называются жиклерами.

**Узнайте, что означают цифры, выбитые на жиклерах.**

В отличие от жидкостей, газы

могут сильно изменять свой объем. Расчеты показывают, что сжимаемостью газов можно пренебречь, если наибольшие скорости в потоке малы по сравнению со скоростью звука в этом газе. Таким образом, уравнение Бернулли можно применять к достаточно широкому классу задач аэродинамики.

Одной из таких задач является изучение сил, действующих на крыло самолета. Строгое теоретическое решение этой задачи чрезвычайно сложно, и обычно для исследования сил применяются экспериментальные методы. Уравнение Бернулли позволяет дать лишь качественное объяснение возникновению подъемной силы крыла. На рисунке 10.9 изображены линии тока воздуха при обтекании крыла самолета. Из-за специального профиля крыла и наличия угла атаки, то есть угла наклона крыла по отношению к набегающему потоку воздуха, скорость воздушного потока над крылом оказывается больше, чем под крылом. Поэтому на рисунке

10.9 линии тока над крылом располагаются ближе друг к другу, чем под крылом.

Из уравнения Бернулли следует, что давление в нижней части крыла будет больше, чем в верхней; в результате появляется сила  $\vec{F}$  действующая на крыло. Вертикальная составляющая  $F_y$  этой силы

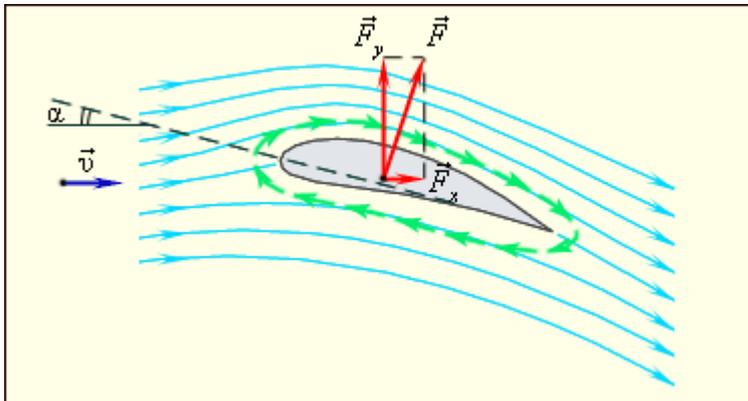


Рисунок.10.9.– Образование подъемной силы крыла

называется подъемной силой. Подъемная сила позволяет компенсировать силу тяжести, действующую на самолет, и тем самым она обеспечивает возможность полета тяжелых летательных аппаратов в воздухе.

Горизонтальная составляющая  $F_x$  представляет собой силу сопротивления среды. Линии тока при обтекании крыла самолета и возникновение подъемной силы.  $\alpha$  – угол атаки.

Теория подъемной силы крыла самолета была создана Н. Е. Жуковским. Он показал, что существенную роль при обтекании крыла играют силы вязкого трения в поверхностном слое. В результате их действия возникает круговое движение (циркуляция) воздуха вокруг крыла (зеленые стрелки на рисунке 10.10). В верхней части крыла скорость циркулирующего воздуха складывается со скоростью набегающего потока, в нижней части эти скорости направлены в противоположные стороны. Это и приводит к возникновению разности давлений и появлению подъемной силы (<https://www.youtube.com/watch?v=NNrINMNgYQ0>)

Циркуляция воздуха, обусловленная силами вязкого трения, возникает и вокруг вращающегося тела (например, цилиндра). При вращении цилиндр увлекает прилегающие слои воздуха, вызывая его циркуляцию. Если такой цилиндр установить в набегающем потоке воздуха, то возникнет сила бокового давления, аналогичная подъемной силе крыла самолета. Это явление называется эффектом Магнуса. рисунок. 10.10 иллюстрирует обтекание вращающегося цилиндра набегающим потоком. Эффект Магнуса проявляется, например, при полете закрученного мяча при игре в теннис или футбол. Итак, во многих явлениях аэродинамики существенную роль играют силы вязкого трения. Они приводят к возникновению

циркулирующих потоков воздуха вокруг крыла самолета или вокруг вращающегося тела, к появлению силы сопротивления среды и т. д.

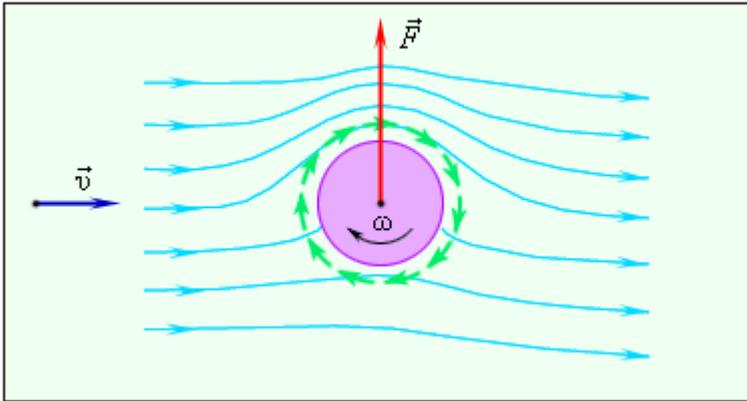


Рисунок.10.10 – Эффект Магнуса

Уравнение Бернулли не учитывает сил трения. Его вывод основан на законе сохранения механической энергии при течении жидкости или газа. Поэтому с помощью уравнения Бернулли нельзя

дать исчерпывающего объяснения явлений, в которых проявляются силы трения. В этих случаях можно руководствоваться только качественными соображениями – чем больше скорость, тем меньше давление в потоке газа.

Реальные жидкости обладают вязкостью, которую также называют силой внутреннего трения или недостаточным скольжением. Для поддержания течения реальной жидкости нужна внешняя сила (насос), которая будет обеспечивать течение жидкости энергией.

Впервые вязкость жидкости исследовал Ньютон. Движение жидкости обеспечивалось движением верхней пластины, которое было обусловлено действием внешней силы. Жидкость тела послойно, причём максимальной скоростью характеризовался слой, прилегающий к подвижной пластине, а минимальной скоростью – прилегающий к неподвижной пластине.

При движении жидкости она испытывает трение со стороны твердых неподвижных тел, труб, плоскостей. Величина этой силы определяется уравнением (10.9), где  $dv/dx$  – градиент скорости,  $S$  – площадь соприкосновения.

$$F_{mp} = \eta \cdot \frac{dv}{dx} \cdot S \quad (10.9)$$

Жидкости, которые подчиняются уравнению Ньютона, называются ньютоновскими. Они однородны, не содержат высокомолекулярных компонентов и примесей (вода, масло, спирт). Их вязкость зависит от рода жидкости и температуры. У

неньютоновских жидкостей (не подчиняются уравнению, суспензии, эмульсии, кровь) – вязкость дополнительно зависит от скорости.

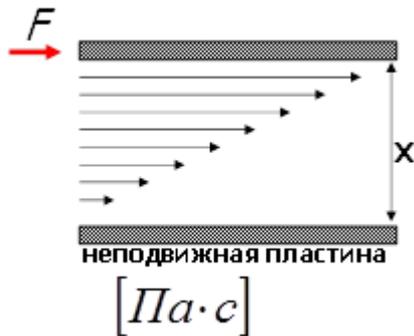


Рисунок.10.11.– Определение вязкости жидкости.

Коэффициент пропорциональности  $\eta$  называется коэффициент динамической вязкости или просто вязкость. Он характеризует сопротивление жидкости (газа) смещению её слоев. Величина  $\varphi=1/\eta$  называется текучестью.

В системе СИ единица динамической вязкости— Па·с. Наряду с динамической часто рассматривают т.н. кинематическую вязкость.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \text{ (где } \rho \text{ — плотность вещества),}$$

которая измеряется в м<sup>2</sup>/с (в СИ;). Вязкость жидкостей и газов определяют вискозиметрами.

Превращение кинетической энергии движущегося потока жидкости в потенциальную энергию давления этой массы жидкости реализуется в гидравлических двигателях- водяном колесе (верхнебойном и нижнебойном), гидротурбине, гидродинамический двигатель.

***Покажите возможность такого преобразования энергии, применив уравнение Бернулли.***

Органическим продолжением такого рода двигателей явились гидродинамические передачи, механизм для бесступенчатого изменения передаваемого от двигателя крутящего момента или частоты вращения вала машины-орудия.

(<https://www.youtube.com/watch?v=qG3-xKrr-0Q>)

Гидродинамические или поточные передачи включают в себя центробежный насос и турбину, причём рабочей, передающей средой по прежнему является жидкость (чаще всего масло). В отличие от гидростатических коробок передач, в рассматриваемых коробках передач основное действие осуществляется за счет кинетической энергии  $mv^2/2$  передающей среды. Отсюда, в частности, следует, что рабочие свойства такой передачи зависят от массы передающей среды и от квадрата ее скорости. Поэтому каждая передача имеет свою вполне определенную характеристику передаваемой мощности или, как иногда говорят, передача воспринимает только определенную мощность в соответствии с данным числом оборотов. При заданной величине диаметра  $D$  круга циркуляции (рабочей полости) передачей может быть передан крутящий момент  $M_1 = fD^b n$

кгм, где коэффициент  $f$  зависит от конструкции передачи и от рода рабочей жидкости;

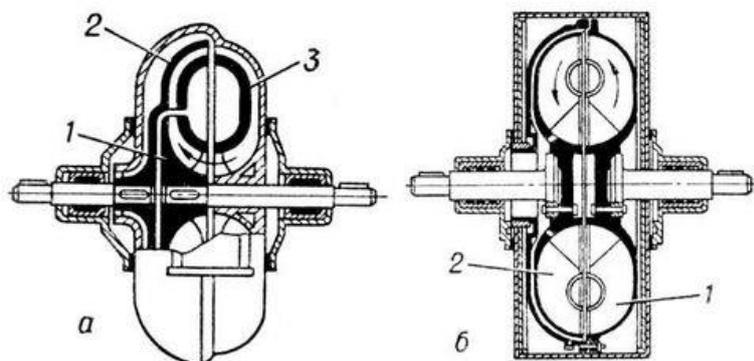


Рисунок.10.12. – Гидродинамические передачи: а — гидротрансформатор; б — гидромуфта; 1 — рабочее колесо насоса, установленное на ведущем валу; 2 — рабочее колесо гидротурбины, установленное на ведомом валу; 3 — неподвижный направляющий аппарат — реактор. Стрелками показано направление потока рабочей жидкости.

Рабочий процесс гидродинамической передачи осуществляется за счёт работы лопастных насоса и турбины. Гидродинамическая передача была предложена в начале 20 в. в виде соосно расположенных центробежного насоса и турбины, сближенных таким образом, что их колёса образуют горообразную полость, заполненную рабочей жидкостью — маловязким маслом или водой. Побудителем движения жидкости является насос, колесо которого соединено с двигателем; энергия, полученная жидкостью от насоса, передаётся турбиной приводимой машине

([https://www.youtube.com/watch?v=BkA\\_7spJW30](https://www.youtube.com/watch?v=BkA_7spJW30)).

Гидродинамическая передача только с двумя колёсами — насосным и турбинным (рисунок.10.12), имеет равные на обоих валах крутящие моменты и называют гидродинамической муфтой (гидромуфтой). В номинальном режиме частота вращения турбинного вала гидромуфты на 1,5—4% меньше частоты вращения вала насоса; кпд гидромуфты составляет 95—98%.

Гидротрансформаторы имеют три лопаточных колеса (насосное, направляющего аппарата и турбинное) или более. Они бывают с одно- или многоступенчатой турбиной. В последнем случае удаётся расширить область изменения частоты вращения вторичного вала и получить большее увеличение крутящего момента на турбинном колесе по отношению к моменту на валу насоса в режиме страгивания, т. е. когда турбинный вал полностью остановлен (у трёхступенчатых турбин до 12:1). Гидродинамические передачи допускают регулирование крутящего момента за счёт изменения

заполнения их рабочей полости. Этот способ широко применяется для регулирования гидромуфт. Чтобы уменьшить падение КПД в гидротрансформаторах, регулирование ведут поворотом лопастей рабочих колёс. В некоторых конструкциях гидротрансформаторов предусматривается отключение направляющего аппарата, что обращает механизм в гидромуфту — это т. н. комплексная передача. Гидродинамическая передача строится с передаточным отношением от 0,6 до 6 и КПД 0,86—0,92. Раздельная гидродинамическая передача, т. е. отдельно расположенные насос и турбина, соединённые трубами, позволяет произвольно размещать турбину относительно двигателя, дробить мощность двигателя между несколькими потребителями и, наоборот, суммировать мощность нескольких двигателей для привода одной машины. Несмотря на то, что КПД раздельных гидродинамических передач составляет 65—70%, они находят всё большее применение в тех случаях, когда приводимая машина должна размещаться в месте, где невозможно или затруднено обслуживание: приводы буровых установок, насосы топливных систем летательных аппаратов, насосы химических установок и др.

Наибольшее применение гидродинамические передачи, как автоматически действующие бесступенчатые передачи, нашли в трансмиссиях автомобилей, на тепловозах, в судовых силовых установках, приводах питательных насосов и дымососов ТЭЦ. Мощность приводимых через гидромуфты насосов ТЭЦ достигает до 25000 квт.

***Принцип работы пульверизатора, форсунки, карбюратора, циклона необходимо изучить самостоятельно. При описании необходимо обязательно опираться на уравнение Бернулли.***

Зависимость сил сопротивления жидкости или газа движению в них твёрдого тела эффективно используется при гашении колебаний. Для этого конструкции снабжаются газовыми или жидкостными демпферами или амортизаторами. Сила аэродинамического сопротивления сильно зависит от вязкости жидкости или газа.

***Как изменяется вязкость жидкости или газа с увеличением температуры? Опишите работу амортизаторов, устанавливаемых в транспортных средствах. Когда применяют газовые, а когда жидкостные амортизаторы?***

**Аэродинамическое сопротивление, лобовое сопротивление, сила, с которой газ (например, воздух) действует на движущееся в нём тело; эта сила направлена всегда в сторону, противоположную скорости, и является одной из составляющих аэродинамической силы. Знание лобового сопротивления необходимо для аэродинамического расчёта летательных аппаратов, наземных транспортных средств от него зависит, в частности, скорость**

движения при заданных тяговых характеристиках двигательной установки.

Аэродинамическое сопротивление — результат необратимого перехода части кинетической энергии тела в тепло. Зависит аэродинамическое сопротивление от формы и размеров тела, ориентации его относительно направления скорости, значения скорости, а также от свойств и состояния среды, в которой происходит движение. В реальных средах имеют место: вязкое трение в пограничном слое между поверхностью тела и средой, потери на образование ударных волн при около- и сверхзвуковых скоростях движения и на вихреобразование. В зависимости от режима движения и формы тела будут преобладать те или иные компоненты. Аэродинамическое сопротивление, например, для затупленных тел вращения, движущихся с большой сверхзвуковой скоростью, определяется в основном волновым сопротивлением. У хорошо обтекаемых тел, движущихся с небольшой скоростью, аэродинамическое сопротивление определяется сопротивлением трения и потерями на вихреобразование. В аэродинамике сила аэродинамического сопротивления пропорциональна квадрату скорости и рассчитывается по формуле

$$P_v = c_x \cdot S \cdot v^2 \cdot \rho / 2, \quad (10.9)$$

где  $S$  — площадь фронтальной проекции автомобиля, называемая миделево сечение — площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную вектору относительной скорости тела и потока,  $m^2$ ;  $v$  — скорость движения автомобиля относительно воздуха,  $m/s$ ;  $\rho$  — плотность газа,  $kg/m^3$ ;  $c_x$  — коэффициент аэродинамического сопротивления. Коэффициент  $C_x$  тела заданной формы при известной ориентации его относительно потока зависит от скорости и вязкости и некоторых других параметрах, имеющих существенное значение при скоростях, сравнимых со скоростью звука в среде. Численные значения  $C_x$  обычно определяют экспериментально, измеряя аэродинамическое сопротивление моделей в аэродинамических трубах или каналах и других установках, используемых при аэродинамическом эксперименте. Теоретическое определение аэродинамического сопротивления возможно лишь для ограниченного класса простейших тел.

Применительно к автомобильной технике аэродинамическое сопротивление можно представить как сумму нескольких его составляющих. К ним относятся: сопротивление формы; сопротивление трения о наружные поверхности; сопротивление,

вызываемое выступающими частями автомобиля; внутреннее сопротивление.

Сопротивление формы еще называют сопротивлением давления или лобовым сопротивлением. Сопротивление формы является основной составляющей сопротивления воздуха, оно достигает 60 % общего. Механизм возникновения этого вида сопротивления следующий. При движении транспортного средства в окружающей воздушной среде происходит сжатие набегающего потока воздуха в передней части автомобиля. В результате здесь создается область повышенного давления.

Под его влиянием струйки воздуха устремляются к задней части автомобиля. Скользя по его поверхности, они обтекают контур транспортного средства. Однако в некоторый момент начинает проявляться явление отрыва элементарных струек от обтекаемой ими поверхности и образования в этих местах завихрений. В задней части автомобиля воздушный поток окончательно срывается с кузова транспортного средства. Это способствует образованию здесь области пониженного давления, куда постоянно осуществляется подсос воздуха из окружающего воздушного пространства. Классической иллюстрацией наличия зоны пониженного давления является пыль и грязь, оседающие на элементы конструкции задней части транспортного средства. За счет различия давлений воздуха впереди и сзади автомобиля создается сила лобового сопротивления. Чем позже происходит срыв воздушного потока с обтекаемой поверхности и соответственно меньше область пониженного давления, тем меньшей будет и сила лобового сопротивления.

В этом аспекте интересен следующий факт. Известно, что при езде двух формульных болидов друг за другом, уменьшается не только сопротивление движению заднего автомобиля, идущего в воздушном мешке, но и переднего, по измерениям в аэродинамической трубе - на 27%. Происходит это вследствие частичного заполнения зоны пониженного давления и уменьшения разрежения за ним.

Как было нами показано ранее, наибольшее значение для движения автомобиля имеют действующие на него силы сопротивления движению, обусловленные в основном трением и которые при небольших скоростях можно считать линейно зависящими от скорости. Второй силой, оказывающей значительное влияние на скорость движения является сила аэродинамического сопротивления. Аэродинамическое сопротивление автомобиля обусловлено движением последнего с некоторой относительной скоростью в окружающей воздушной среде. Среди всех сил, составляющих сопротивление движению автомобиля, эта

представляет наибольший интерес в свете всевозрастающих скоростей передвижения транспортных средств. Дело все в том, что уже при скорости движения 50-60 км/час она превышает любую другую силу сопротивления движению автомобиля, а в районе 100-120 км/час превосходит всех их вместе взятых. (<https://www.youtube.com/watch?v=fAamSloNYe8>).

Третьей силой, действующей на автомобиль, является сила тяги, которую при постоянном числе оборотов двигателя и неизменном передаточном числе трансмиссии можно считать неизменной. Используя эти три силы, мы уже довольно точно можем определять ускорение автомобиля. Вместе они также определяют максимальную скорость автомобиля для данной мощности двигателя. Если сила тяги превышает все другие силы, то автомобиль ускоряется. Увеличивающаяся скорость, также заставляет увеличиваться силы сопротивления. Равнодействующая сила уменьшается, а следовательно уменьшается и ускорение. В некоторой точке силы сопротивления и сила тяги компенсируют друг друга, и автомобиль достигает своей максимальной скорости для данной мощности двигателя. На этом

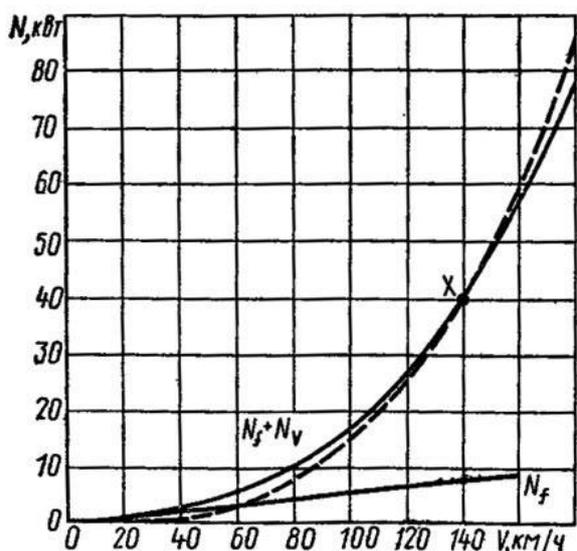


Рисунок 10.13 – Мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивлений движению.

Масса автомобиля 1350 кг, площадь фронтальной проекции  $S$  автомобиля 2 м<sup>2</sup>; коэффициент сопротивления качению  $f$  равен 0,015; коэффициент аэродинамического сопротивления  $C_x$  равен 0,456.

двух сил сопротивления  $N_f + N_v$  показана верхней кривой. Видно, что для автомобиля с приведенными характеристиками для достижения

графике Ось X обозначает скорость автомобиля в км/час и значения требуемой мощности двигателя, которая отмечена по Оси Y. Трение  $N_f$  - линейная функция скорости, а аэродинамическое сопротивление  $N_v$  - квадратичная функция скорости. При низких скоростях трение превышает аэродинамическое сопротивление. При 60 км/час эти две функции пересекаются. При более высоких скоростях аэродинамическое сопротивление является наибольшей силой сопротивления. Сумма из

максимальной скорости 10км/час достаточно двигателя 18 кВт, а для достижения скорости 140 км/час уже 40 кВт. Так как сила аэродинамического сопротивления пропорциональна квадрату скорости, то часть мощности двигателя, идущей на преодоление сопротивления воздуху пропорциональна кубу скорости, т. е увеличение скорости в два раза требует увеличения мощности на преодоление сопротивления в восемь раз:

Дело в том, что любая поверхность обладает различной поверхностной энергией, способной в различной степени повлиять на окружающую среду. Чем больше значение поверхностной энергии у материала покрытия автомобиля, тем сильнее его поверхность взаимодействует на молекулярном уровне с окружающей воздушной средой, и тем больше энергии необходимо затратить на разрушение сил Ван-дер-Ваальса (сил взаимного притяжения молекул), препятствующих взаимному перемещению объемов соприкасающихся веществ. На данный вид потерь приходится около 10 - 20% всех аэродинамических потерь. Меньшие значения сопротивления трения относятся к автомобилям, обладающим новыми, хорошо отполированными покрытиями, большие к автомобилям с плохо окрашенными кузовами или покрытиями, которые с течением времени утратили большинство своих потребительских свойств.(  
<https://www.youtube.com/watch?v=ruZcqhJxH34> ).

Аэродинамика автомобиля – это наука, которая остаётся экспериментально доказываемой. Для снижения сопротивления движущегося тела, необходимо проанализировать его форму. Учесть возможные боковые ветры, воздействующие на кузов автомобиля. Распределение давлений вокруг движущейся машины отражается на ее движении по дороге. Устойчивость на больших скоростях падает. В нынешнее время делается очень много попыток, чтобы оптимизировать форму автомобиля, потому что необходимо постоянно иметь сцепление с дорогой и устойчивость при ветре, в том числе боковом и тыльном, а также влияет рельеф и характер дороги на аэродинамическое равновесие. Аэродинамичная форма кузова автомобиля – это составляющая безопасности и комфорта езды.

( <https://www.youtube.com/watch?v=AY9Tg7MOUtg> ).

Сразу хотелось бы отметить, что на сегодняшний день не существует методик теоретического расчета силы аэродинамического сопротивления, а поэтому ее величину возможно определить только экспериментально. Конечно, неплохо было бы еще на стадии проектирования произвести количественную оценку аэродинамики автомобиля и, изменяя определенным образом форму кузовных

деталей, оптимизировать ее. Но, увы, решить данную задачу оказалось не так просто. Найти выход из сложившейся ситуации, конечно же, пытались. В частности, путем создания каталогов, где значению аэродинамического сопротивления объекта ставились в соответствие основные параметры его формы. Такой подход оправдывает себя лишь в случаях его применения к относительно простым в аэродинамическом смысле телам. Число же параметров, описывающих геометрию легкового автомобиля, слишком велико, и отдельные поля потоков находятся в весьма сложном взаимодействии друг с другом, так что и в этом случае попытка приручить аэродинамику провалилась

**Тема 11 Смачивание и не смачивание. Капиллярные явления. Использование в технике. Физика процессов склеивания, пайки и сварки.**

Силы взаимодействия молекул в различных веществах различны, так же как они различны у одного и того же вещества при разных агрегатных состояниях. В зависимости от характера взаимодействия между молекулами жидкости и твердого тела на границе их соприкосновения наблюдают явления смачивания и не смачивания. Капля воды на чистой стеклянной пластинке теряет свою сферическую форму и растекается, образуя тонкую пленку. Происходит это потому, что силы сцепления между молекулами воды и стекла превышают аналогичные силы между молекулами воды – вода смачивает стекло. Капля ртути на той же пластинке остается сферической: силы сцепления между молекулами ртути больше сил сцепления между молекулами ртути и стекла – ртуть стекло не смачивает. Рассуждая аналогично приходим к выводу:

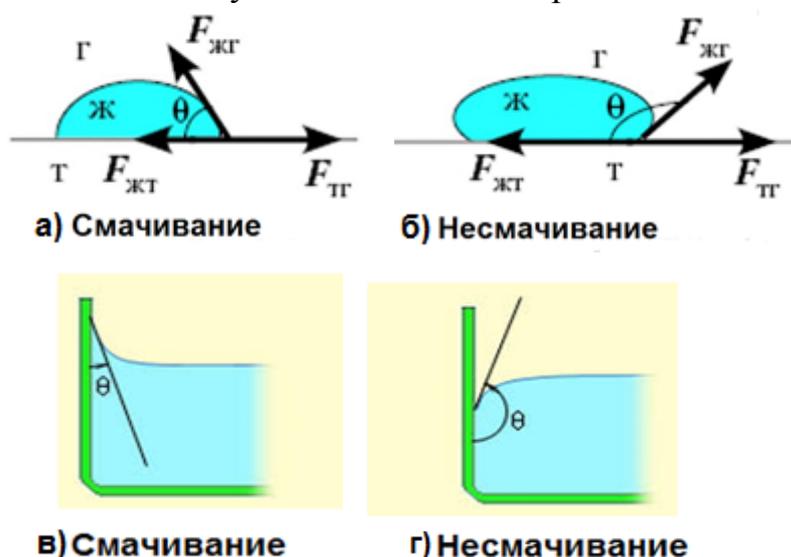


Рисунок.11.1.– Смачивание и не смачивание в капле и в сосуде

Зависимость формы капли от материала подложки объясняется различием сил взаимодействия молекул жидкости  $F_{жс}$  с молекулами твердого тела на границе раздела двух сред  $F_{жт}$ . Если  $F_{жт} > F_{жс}$  то жидкость

смачивает твердое тело. Если жидкость находится внутри сосуда, то она образует вогнутый мениск (рисунок 11.1а). Если жидкость находится на горизонтальной поверхности твердого тела (рисунок 11.1, б), то происходит ее растекание по этой поверхности. Угол  $\Theta$  между поверхностью твердого тела и касательной, проведенной к поверхности жидкости в точке ее соприкосновения с твердым телом, называют краевым углом. При смачивании краевой угол является острым, т.е.  $0 < \Theta < 90$  —. Случай, когда  $\Theta = 0$  называется полным смачиванием.

Если  $F_{\text{жст}} < F_{\text{жж}}$ , то жидкость не смачивает твердое тело. Жидкость, находящаяся в сосуде, образует выпуклый мениск (рисунок. 11. 1, в). Жидкость на горизонтальной поверхности имеет тем меньшую площадь соприкосновения, чем больше несмачивание. Краевой угол при несмачивании тупой, т.е.  $90 < \Theta < 180$ . Случай  $\Theta = 180$  соответствует полному несмачиванию. Одно и то же твердое тело может смачиваться одними жидкостями, а другими не смачиваться, Например, стекло смачивается водой, а ртуть стекло не смачивает. <https://www.youtube.com/watch?v=xf23MmZpkD0t>

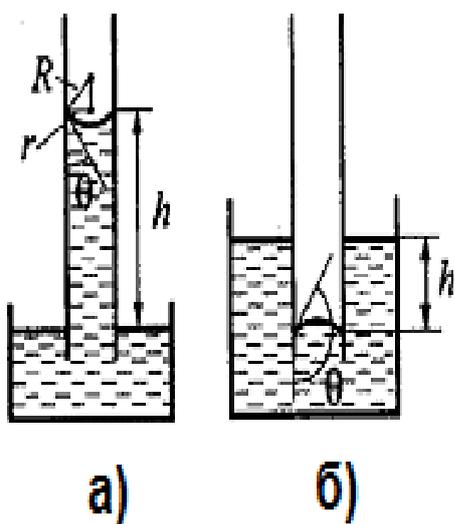


Рисунок.11.2. – Капилляр в смачивающей (а) и несмачивающей (б) жидкости.

Неразрывно с явлениями смачивания и несмачивания связано явление капиллярности. Капилляр - это трубка очень малого диаметра. Если опустить капилляр в сосуд с водой, то вода поднимется по нему выше уровня в сосуде, причем ее поверхность (мениск) будет иметь вогнутую форму. Уровень ртути в таком же капилляре, напротив, будет ниже уровня в самом сосуде, а мениск будет выпуклым. Поскольку сцепление между молекулами воды и стекла сильнее, чем между самими молекулами воды, вода как бы «взбирается» по стенкам капилляра, пока давление ее столбика в капилляре не уравновесится давлением, обусловленным межмолекулярными силами. Вогнутый мениск образуется потому, что на молекулы воды вблизи стенок капилляра действует отличная от нуля сила, направленная к стенке. Для ртути наблюдается обратная картина.

В достаточно широких сосудах короткодействующие силы притяжения между молекулами жидкости и твердого тела удерживают в форме мениска небольшое количество жидкости в сосуде. В капиллярах масса жидкости незначительна. Поэтому различие в силах притяжения между молекулами жидкости и твердого тела оказывает заметное влияние на жидкость.

Капиллярность - это явление подъема или опускания жидкости в капиллярах. [https://www.youtube.com/watch?v=xqP\\_6NOyDAw](https://www.youtube.com/watch?v=xqP_6NOyDAw)

При смачивании жидкость в капилляре поднимается относительно уровня жидкости в сосуде. При несмачивании жидкость в капилляре опускается относительно уровня жидкости в сосуде (рисунок 11.2).

Изменение уровня жидкости продолжается до тех пор, пока молекулярные силы, действующие вверх, уравниваются силой тяжести столба жидкости высотой  $h$ . Определим эту высоту. Вес столба жидкости  $P$  по модулю равен

$$P = \rho g V = \rho g \pi r^2 h. \quad (11.1)$$

где  $\rho$  - плотность жидкости,  $V$  - объем столба жидкости),  $r$  - радиус. капилляра,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ . Сила поверхностного натяжения действует по длине окружности мениска, т.е  $l = 2\pi r$ . Поэтому модуль силы поверхностного натяжения равен

$$F = 2\pi r \sigma. \quad (11.2)$$

Но сила поверхностного натяжения и является той силой, которая удерживает столб жидкости весом  $P$

Приравнявая правые части уравнений находим для высоты поднятия жидкости

$$h = 2 \sigma / \rho g r \quad (11.3)$$

Из этой формулы, носящей имя Жюрена, следует, что высота поднятия жидкости в капилляре обратно пропорциональна радиусу капилляра. С помощью этой формулы, зная плотность жидкости и радиус капилляра и измерив высоту поднятия жидкости, можно вычислить коэффициент поверхностного натяжения.

Если жидкость не смачивает капилляр, то силы притяжения между молекулами жидкости превосходят силы притяжения между молекулами твердого тела и жидкости. Жидкость в капилляре опускается (рисунок 11.2, б) на величину  $h$ . Значение  $h$  находится по той же формуле, что и высота подъема.

Капиллярное впитывание играет существенную роль в водоснабжении растений, передвижении влаги в почвах и др. пористых телах. Капиллярная пропитка различных материалов широко применяется в процессах хим. технологии. <https://www.youtube.com/watch?v=Tu9h92ieXkQ>

Капиллярные явления играют важную роль в технике. Например, через щель, образованную двумя плоскостями, соединенными болтами просачивается масло, т.к. щель является капилляром и по ней масло может подняться на значительное расстояние. Такой капиллярный подсос масла обрастает пылью и ухудшает как внешний вид деталей, так и их работу. Для предотвращения этого используют прокладки. Но иногда прокладки

не могут устранить сам капилляр, и приходится использовать жидкие герметики. **Объясните, почему более сильное сжатие скрепляемых поверхностей (подтяжка гаек или болтов) в большинстве случаев не приносит пользы, а еще и усугубляет положение.**

(<https://www.youtube.com/watch?v=6yLrTZMB1m4>)\_

Капилляры используют для смазывания не сильно нагруженных деталей при помощи так называемой фитильной смазки. **Объясните, как она работает?**

По фитилю горючее поднимается в спиртовках и керосиновых лампах, влага поднимается по стволам растений. Из глубинных слоев земли влага поднимается к поверхности, где растут растения, поэтому для ускорения высыхания полей их прикатывают, что уменьшает размеры пор капилляров и упрощает подъем влаги к поверхности испарения. Закрытие влаги на полях осуществляют боронованием, разрушающем капилляры и прекращающем капиллярный ток влаги к поверхности.

В капиллярах существует избыточное давление под искривленной поверхностью, вызванное действием поверхностного натяжения. Если поверхность выпуклая - давление увеличивается, если вогнутая - уменьшается. Это уменьшение давления может быть настолько большим, что пары воды над капиллярным мениском становятся насыщенными. Пар начинает конденсироваться в капилляре.

Возникает так называемая капиллярная конденсация - конденсация пара в капиллярах и микротрещинах пористых тел, а также в промежутках между тесно сближенными твердыми частицами или телами. Необходимое условие капиллярной конденсации - смачивание жидкостью поверхности тела (частиц). Капиллярная конденсация начинается с адсорбции молекул пара поверхностью конденсации и образования менисков жидкости. Т. к. имеет место смачивание, форма менисков в капиллярах вогнутая и давление насыщенного пара над ними ниже, чем давление насыщенного пара  $p_0$  над плоской поверхностью.

Капиллярная конденсация увеличивает поглощение (сорбцию) паров пористыми телами, в особенности вблизи точки насыщения паров. Процесс используется для улавливания жидкостей тонкопористыми телами (сорбентами) и играет большую роль в процессах сушки, удержания влаги почвами, строительными и др. пористыми материалами.

<https://www.youtube.com/watch?v=skJtNWFz1J4>

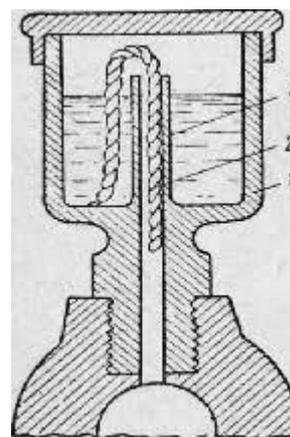


Рисунок.11.3.  
Фитильная смазка

Явления смачивания и не смачивания, как и капиллярные явления, играют важную роль в процессах изготовления неразъемных соединений, - соединений изготавливаемых сваркой или пайкой.

Наибольшее распространение получили два вида сварки плавлением:

— электрическая дуговая, где источником тепла является электрическая дуга;

— газовая, при которой нагрев и расплавление металла происходит за счет тепла пламени газовой горелки.

<https://rem-serv.com/payka-i-svarka-otlichie/>

При электрической дуговой сварке энергия, необходимая для образования и поддержания дуги, поступает от источников питания постоянного или переменного тока. В процессе электрической дуговой сварки основная часть теплоты, необходимая для нагрева и плавления металла, получается за счет дугового разряда (дуги), возникающего между свариваемым металлом и электродом. При сварке плавящимся электродом под воздействием теплоты дуги кромки свариваемых деталей и торец (конец) плавящегося электрода расплавляются, и образуется сварочная ванна. При затвердевании расплавленного металла образуется сварной шов. В этом случае сварной шов получается за счет основного металла и металла электрода. Ясно, что материал электрода должен смачивать стенки сварочной ванны и иметь тот же коэффициент линейного расширения, что и основной металл. Этого добиваются подбором материала электрода. Однако расплавленный металл может легко окисляться и образовывать несмачиваемые поверхности, что приведет к нарушению целостности сварного шва и его прочности. По способу защиты сварочной ванны, самой дуги и конца нагреваемого электрода от воздействия атмосферных газов дуговая сварка разделяется на следующие виды: сварка покрытыми электродами, в защитном газе, под флюсом, самозащитной порошковой проволокой и со смешанной защитой.

Пайка имеет много общего со сваркой плавлением, но между ними имеются и принципиальные различия. Если при сварке основной и присадочный металлы находятся в сварочной ванне в расплавленном состоянии, то при пайке основной металл остается твердым, а присадочный материал (припой) находится в жидком состоянии. <https://www.youtube.com/watch?v=stO6bD3UVIA>

В отличие от сварки плавлением пайка может быть осуществлена при любых температурах, лежащих ниже температуры плавления основного металла. Одним из преимуществ пайки является возможность соединения в единое целое за один прием множества заготовок, составляющих изделие. Поэтому пайка, как ни один

другой способ соединения, отвечает условиям массового производства. Она позволяет соединять разнородные металлы, а также металлы со стеклом, керамикой, графитом и другими неметаллическими материалами, что невозможно или весьма трудно осуществить сваркой.

Пайкой называется технологический процесс соединения металлических заготовок без их расплавления посредством введения между ними расплавленного промежуточного металла-припоя. Припой имеет температуру плавления более низкую, чем температура соединяемых металлов, и заполняет зазор между соединяемыми поверхностями за счет действия капиллярных сил. При охлаждении припой кристаллизуется и образует прочную связь между заготовками. В процессе пайки наряду с нагревом необходимо удаление окисных пленок с поверхности паяемых металлов. Образование соединения без расплавления кромок обеспечивает возможность распая, т. е. разъединения паяемых заготовок без нарушения исходных размеров и формы элементов конструкции. Качество паяного шва во многом зависит от прочности связи припоя с металлом основы. В результате смачивания твердой металлической поверхности между припоем и основным металлом возникает межатомная связь. Эта связь может образоваться:

- при растворении металла основы в расплавленном припое с образованием жидкого раствора, распадающегося при последующей кристаллизации;

- за счет диффузии составляющих припой элементов в основной твердый металл с образованием твердого раствора;

- за счет реактивной диффузии между припоем и основным металлом с образованием на границе интерметаллических соединений;

- за счет бездиффузионной связи в результате межатомного взаимодействия.

Для получения спая, т. е. связи на границе основной металл — припой, наряду с нагревом необходимо обеспечить еще два основных условия: удалить с поверхности металлов окисную пленку и обеспечить условия взаимодействия твердого и жидкого металлов, по сути чтобы припой смачивал металл. При пайке формирование шва происходит путем заполнения припоем зазора между соединяемыми деталями, т. е. процесс пайки в большинстве случаев связан с капиллярным течением, что не имеет места при сварке плавлением.

[https://academy.evolvector.ru/index.php?route=product/product&product\\_id=66](https://academy.evolvector.ru/index.php?route=product/product&product_id=66)

Поскольку при пайке не происходит расплавления кромок паяемых деталей, то при использовании этого способа соединения

проще сохранить в процессе изготовления требуемую форму и размеры изделия. Применяя низкотемпературную пайку, удастся сохранить неизменной структуру и свойства металла соединяемых деталей.

В большинстве случаев этими же соображениями руководствуются и при склеивании поверхностей. Особое значение при склеивании передается созданию на плоскости, покрытой слоем клея, активных поверхностей, действующих подобно застежке «Молния», прочность склеенного соединения в этом случае определяется в основном силой сжатия уже высохших слоев клея.

<https://www.stena.ee/blog/opusy-pro-ego-velichestvo-klej>

*Изобразите схематически эти клеевые слои.*

## Тема 12 Тепловые явления. Тепловое расширение. Теплопередача.

Общеизвестно, что вещество обычно расширяется при нагревании и сжимается при охлаждении, т.е. происходит тепловая деформация тела под действием молекулярных сил в процессе нагревания и охлаждения. Это явление объясняется тем, что повышение температуры связано с увеличением скорости движения молекул, а это ведет к увеличению межмолекулярных расстояний и в свою очередь, к расширению тела.

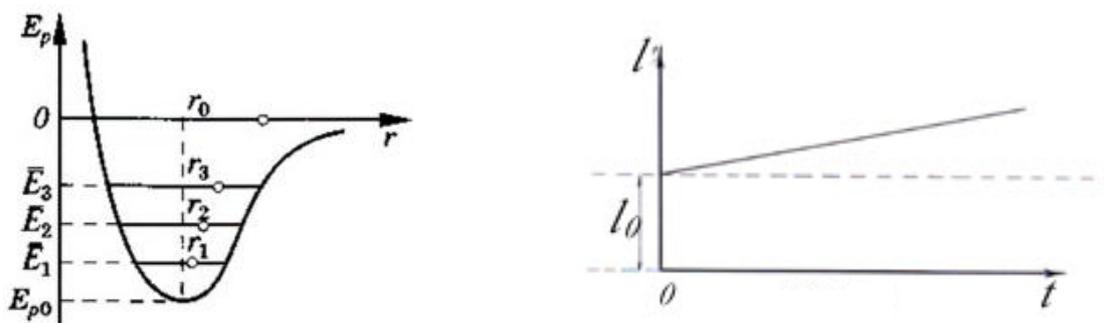


Рисунок 12.1– Зависимость потенциальной энергии молекул от температуры

На рисунке 12.1 показана зависимость потенциальной энергии  $E_p$  взаимодействия молекул от расстояния между ними, называемый потенциальной ямой.  $E_{p0}$  – минимальное значение потенциальной энергии, которому соответствует расстояние между атомами  $r_0$  при абсолютном нуле – это состояние равновесия. Зависимость потенциальной энергии взаимодействия молекул от расстояния между ними позволяет выяснить причину возникновения теплового расширения. Кривая потенциальной энергии сильно несимметрична. Она очень быстро (круто) возрастает от минимального значения  $E_{p0}$  (в точке  $r_0$ ) при уменьшении  $r$  и сравнительно медленно растет при увеличении  $r$ . Среднее расстояние между молекулами обозначено пустыми точками и как видно с увеличением энергии молекул (температуры тела) это расстояние увеличивается. Это же демонстрирует график, приведенный справа.

<https://www.youtube.com/watch?v=v67fhyFWDtk> и  
<https://www.youtube.com/watch?v=wWXXyCNf0wk>

При абсолютном нуле в состоянии равновесия молекулы находились бы друг от друга на расстоянии  $r_0$ , соответствующем минимальному значению потенциальной энергии  $E_{p0}$  по мере нагревания молекулы начинают совершать колебания около положения равновесия. Размах колебаний определяется средним

значением энергии  $E$ . Если бы потенциальная кривая была симметричной, то среднее положение молекулы по-прежнему бы соответствовало бы расстоянию  $r_0$ . Это означало бы общую неизменность средних расстояний между молекулами при нагревании и, следовательно, отсутствие теплового расширения. на самом деле кривая не симметрична. Поэтому при средней энергии, равной  $E_1$ , среднее положение колеблющейся молекулы соответствует расстоянию  $r_1 > r_0$ .

Изменение температуры на одно то же число градусов характеризует одинаковую среднюю квадратичную скорость молекул.

$$E_k = \frac{m_0 v^2}{2} \quad (12.1)$$

молекул с меньшей массой будет меньше, чем молекул с большой массой. Поэтому межмолекулярные пространства различных веществ изменяются различно при одинаковой температуре, что и приводит к неодинаковому расширению. Изменение среднего расстояния между двумя соседними молекулами означает изменение расстояния между всеми молекулами тела. Поэтому размеры тела увеличиваются. Дальнейшее нагревание тела приводит к увеличению средней энергии молекулы до некоторого значения  $E_2$ ,  $E_3$  и т.д. При этом увеличивается и среднее расстояние между молекулами, так как теперь колебания совершаются с большей амплитудой вокруг нового положения равновесия:  $r_2 > r_1$ ,  $r_3 > r_2$  и т. д.

***Нарисуйте на одном графике примерный вид потенциальных энергий двух разных металлов и объясните их.***

Следует отметить, что вода при изменениях температуры от 0 до 4 градусов Цельсия не подчиняется описанным выше законам и ведет себя аномально.

<https://www.youtube.com/watch?v=vpI5jACSROY>

***Опишите аномальные особенности теплового расширения воды.***

Из-за аномальных свойств воды и низкой температуры её кристаллизации в системах охлаждения двигателей внутреннего сгорания используют криогенные жидкости с низкой температурой замерзания – антифризы.

[https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=27&v=-TMx7V0rMMk&feature=emb\\_logo](https://www.youtube.com/watch?time_continue=27&v=-TMx7V0rMMk&feature=emb_logo)

Антифризы представляют собой раствор этиленгликоля в воде или насыщенный раствор смеси солей с ингибиторами коррозии. Однако использование антифризов в системах охлаждения имеет некоторые особенности.

<https://www.youtube.com/watch?v=J0NhT4Kub7o>

**Какие это особенности?**

Посмотрите на рисунок.12.1 справа, на нем показан график зависимости линейных размеров от температуры.

Удлинение, отнесенное к единице длины и единице прироста температуры, называется коэффициентом линейного расширения ( $\alpha$ ).

$$[\alpha] = \text{K}^{-1} = \frac{1}{\text{K}} \text{ или } [\alpha] = {}^{\circ}\text{C}^{-1} = \frac{1}{{}^{\circ}\text{C}} \quad (12.2)$$

Следует знать, что  $\alpha$ - очень малая величина и находится по таблице.

Пусть  $\Delta l$  обозначает прирост длины стержня,  $l_0$  – его начальная величина при  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $l_t$  - его длина при температуре  $t$ . Тогда

$$\Delta l = l_t - l_0 = l_0 \alpha t, \quad l_t = l_0(1 + \alpha t). \quad (12.3)$$

Обратно

$$, l_0 = l_t (1/(1 + \alpha t)) \approx l_t (1 - \alpha t), \quad (12.4)$$

так как  $\alpha$  очень мало и членами высших порядков можно пренебречь:

$$1/(1 + \alpha t) = 1 - \alpha t + \alpha^2 t^2 - \alpha^3 t^3 \dots \quad (12.5)$$

Двучлен  $(1 + \alpha t)$  называется биномом линейного расширения. Он показывает, во сколько раз увеличилась длина тела при нагревании его от  $0^{\circ}$  до  $t^{\circ}\text{C}$ .

Формула

$$l_t = l_0(1 + \alpha t) \quad (12.6)$$

является приближенной и ею можно пользоваться при не очень больших температурах ( $200^{\circ}\text{C}$ - $300^{\circ}\text{C}$ ).

При больших изменениях температуры эту формулу применять нельзя.

б) Часто при решении задач пользуются другой приближенной формулой, которая упрощает вычисления. Например, если необходимо вычислить длину тела при нагревании от температуры  $t_1$  до температуры  $t_2$ , то используют формулу:

$$l_2 \sim l_1 [1 + \alpha (t_2 - t_1) \alpha], \quad (12.7)$$

коэффициент линейного расширения

$$\alpha = \frac{l_2 - l_1}{l_1 \cdot (t_2 - t_1)} \quad (12.8)$$

Естественно, что если увеличиваются линейные размеры тела то изменяется и объем тела.

Увеличение объема тел при нагревании называется объемным расширением.

Объемное расширение характеризуется коэффициентом объемного расширения и обозначается через  $\beta$ .

*Задание: по аналогии с линейным расширением дать определение коэффициента объемного расширения и вывести*

формулу  $\beta = \frac{V_t - V_0}{V_0 \Delta t}$  . (12.9)

Найдем зависимость объема твердого тела от температуры. Из формулы

$$\beta = \frac{V_t - V_0}{V_0 t} \quad (12.10)$$

найдем конечный объем  $V_t$ .

$$V_t - V_0 = \beta V_0 t, \quad V_t = V_0 + \beta V_0 t, \quad V_t = V_0(1 + \beta t). \quad (12.11)$$

Двучлен  $(1 + \beta t)$  называется биномом объемного расширения. Он показывает, во сколько раз увеличился объем тела при нагревании его от 0 до  $t^\circ\text{C}$ .

Для объемного расширения кубика получаем:

$$\Delta V = l^3 - l_0^3, \quad l_t^3 = l_0^3 (1 + \alpha t)^3 = l_0^3 (1 + 3\alpha t + 3\alpha^2 t^2 + \alpha^3 t^3). \quad (12.12)$$

Так как  $\alpha$  очень мало, то при обычно встречающихся температурах можно пренебречь обоими последними членами в скобках. Тогда

$$V_t = V_0(1 + \beta t), \quad \beta = 3\alpha. \quad (12.13)$$

Объемный коэффициент расширения  $\beta$  с достаточной для практических нужд точностью равен утроенному значению коэффициента линейного расширения.

Выясним, как изменяется плотность тел при изменении температуры.

Плотность тела при  $0^{\circ}\text{C}$ .  $\rho = m/V$ , откуда  $m = \rho_0 \cdot V_0$ , где  $m$  – масса тела;  $V_0$  – объём при  $0^{\circ}\text{C}$ ;

$m = \text{const}$  при изменении температуры, но объём тела изменяется, значит меняется и плотность.

На этом основании можно написать, что плотность тела при

$$\rho = \frac{\rho_0 \cdot V_0}{V_t} \quad \text{т.к.} \quad (12.14)$$

температуре  $t = 0^{\circ}\text{C}$

$$V_t = V_0(1 + \beta t), \text{ то} \quad (12.15)$$

$$\rho_0 = \frac{V_t}{1 + \beta t} \cdot \rho_t = \frac{\rho_0 \cdot V_t}{(1 + \beta t) \cdot V_t} \cdot \rho_t = \frac{\rho_0}{1 + \beta t} \quad (12.16)$$

При расчётах нужно учитывать, что в таблицах указывается плотность вещества при  $0^{\circ}\text{C}$ . Плотность при других температурах, вычисляется по формуле  $\rho_t$ . При нагревании  $\rho_t$  – уменьшается, при охлаждении  $\rho_t$  – увеличивается.

Тепловое расширение надо обязательно учитывать при термообработке и при термическом способе изготовления деталей и оборудования, при строительстве машин, трубопроводов, электрических линий, мостов, зданий, подверженных температурным изменениям. При расширении тела происходит увеличение его объема, и говорят об объемном расширении тела. Но иногда нас интересует лишь изменение одного размера, например длины железнодорожных рельсов или металлического стержня. В том случае говорят о линейном расширении. Конструкторы автомобилей интересуются расширением поверхности листов металла, применяемых при постройке машины. Здесь вопрос стоит о поверхностном расширении.

В технике также приходится считаться с тепловым расширением: рельсовые стыки, мостовые опоры, ввод тока в лампах накаливания, железобетон (железо и бетон имеют одинаковые коэффициенты расширения), расширение электрических проводов при нагревании их током.

Обод (бандаж) колеса железнодорожного вагона изготавливают из стали, остальную часть колеса делают из более дешевого металла – чугуна. Бандажи на колеса надевают в нагретом состоянии. После охлаждения они сжимаются и поэтому держатся прочно.

Также в нагретом состоянии надевают шкивы, подшипники на валы, железные обручи на деревянные бочки и т. д. При сжатии или

расширении тел возникают огромные механические напряжения, если другие тела препятствуют изменению размеров. Эти силы и удерживают скрепляемые части.



Рисунок 12.2.– Тепловой зазор между рельсами железной дороги

На рисунке 12.2 показан стык двух смежных рельсов, которые отделены друг от друга промежутками 0,6-1,2 см.

Указанный зазор между стыкам рельсов устанавливается потому, что рельсы при нагревании расширяются и сжимаются при охлаждении.

Следовательно, если дорога строилась зимой, то надо было оставить некоторый запас, чтобы дать рельсам свободно расширяться в жаркое время года. Именно по этой причине в тепловых двигателях устанавливают так называемые тепловые зазоры.

***Укажите наиболее значимые зазоры в двигателе?***

Две разнородные пластины (например, железная и медная), сваренные вместе, образуют так называемую биметаллическую пластинку. При нагревании такие пластинки изгибаются вследствие того, что одна расширяется сильнее другой. Та из полосок (медная),

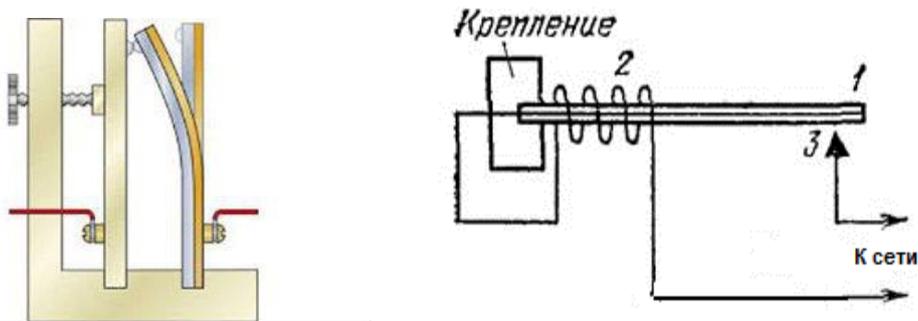


Рисунок. 12.3. – Биметаллическая пластина в автоматическом предохранителе и с регулировкой тока срабатывания (слева) и регулятора температуры (справа).

которая расширяется больше, оказывается всегда с выпуклой стороны. Это свойство биметаллических пластинок широко используется для измерения температуры и её регулирования. Еще одно применение биметаллических пластинок в качестве устройств,

ограничивающих ток в цепи, то есть в качестве предохранителей, которые называются автоматическими.

На рисунке 12.3.(слева) схематически изображено устройство одного из типов автоматического предохранителя, *принцип работы которого предлагается описать учащимся самостоятельно. Нарисуйте его, обозначьте цифрами его части и укажите, для чего нужен винт в устройстве.*

Справа на рисунке показано схематическое устройство регулятора температуры. Биметаллическая пластинка 1, являющаяся частью проводника электрического тока в не нагретом состоянии контактирует с неподвижным контактом 3, подводя электрический ток к нагревательной спирали 2. При включении в сеть спираль нагревается и нагревает биметаллическую пластинку, которая изгибается вверх, размыкая электрическую цепь. При охлаждении пластинка опять выпрямляется, электрическая цепь замыкается и процесс повторяется. Для возможности регулирования температуры контакт 3 выполняют подвижным, так, чтобы можно было отодвигать или приближать его к пластинке, тем самым регулируя время нагрева спирали и температуру.

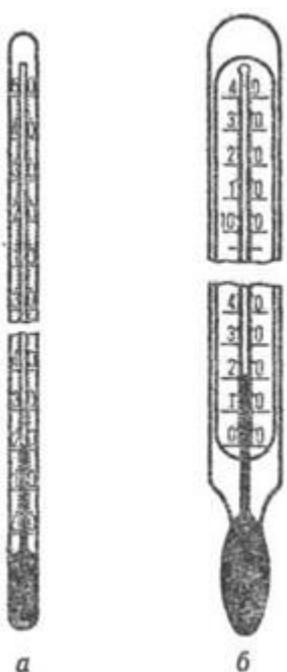


Рисунок.12.4.  
– Жидкостные  
стеклянные  
термометры  
расширения

нагревается и нагревает биметаллическую пластинку, которая изгибается вверх, размыкая электрическую цепь. При охлаждении пластинка опять выпрямляется, электрическая цепь замыкается и процесс повторяется. Для возможности регулирования температуры контакт 3 выполняют подвижным, так, чтобы можно было отодвигать или приближать его к пластинке, тем самым регулируя время нагрева спирали и температуру.

[https://www.youtube.com/watch?v=gI\\_YHRShxs](https://www.youtube.com/watch?v=gI_YHRShxs)

Подобный терморегулятор устанавливают в инкубаторах, где требуется поддерживать температуру постоянной. В быту терморегуляторы установлены в холодильниках, электроутюгах и т.д.

Свойство жидкостей расширяться при нагревании и сжиматься при охлаждении используется в приборах, служащих для измерения температуры - термометрах. В качестве жидкостей для изготовления термометров применяют ртуть, спирт и др.

[https://www.youtube.com/watch?v=ho1pn2u\\_n3k](https://www.youtube.com/watch?v=ho1pn2u_n3k)

Жидкостные термометры широко применяются в технике и лабораторной практике для измерения температур в диапазоне от – 200 до 750 °С и представляет собой прозрачный стеклянный (редко кварцевый) резервуар с припаянным к нему капилляром (из того же материала). Шкала в °С наносится непосредственно на толстостенный капилляр или на пластинку, жестко соединённую с ним. Термометрическая жидкость заполняет весь резервуар и часть капилляра. В зависимости от диапазона измерений, этиловым

спиртом (от -80 до 70 °С), керосином (от -20 до 300 °С), ртутью (от -35 до 750 °С) и др.

Наиболее распространены ртутные термометры, так как ртуть остаётся жидкой в диапазоне температур от -38 до 356 °С. Кроме того, ртуть легко поддаётся очистке, не смачивает стекло, и её пары в капилляре создают малое давление. Жидкостные термометры изготавливают из определённых сортов стекла и подвергают специальной термической обработке («старению»), устраняющей смещение нулевой точки шкалы. Жидкостные термометры имеют шкалы с различной ценой деления от 10 до 0,01 °С. Точность термометров определяется ценой делений его шкалы. Основные недостатки жидкостных термометров — значительная тепловая инерция и не всегда удобные для работы габариты.

Действие манометрического термометра (рисунок 12.5) основано на одном из трёх принципов: тепловом расширении жидкости, температурной зависимости давления газа и температурной зависимости давления насыщенных паров жидкости. Различают газовые (азот), жидкостные (ртуть) и конденсационные, или парожидкостные (хлористый этил и др.) манометрические термометры.

<https://www.youtube.com/watch?v=6PTCYjTIUdQ>

Конструктивно они представляют собой герметичную систему, состоящую из баллона 1, заполненного жидкостью, например спиртом (для низких температур) или ртутью или галием (для высоких температур), соединённого капилляром 2 с пружинным манометром 3 (показывающим или самопишущим), установленном на основании 4. При увеличении давления в баллоне 1, вызванном повышением температуры, увеличивается и давление насыщенных паров в капилляре 2, которое определяется манометром 3, показания которого через тягу 5 и квадрант 6, передаётся стрелочному механизму. Они широко распространены в качестве приборов технического назначения в диапазоне температур от -60 до 550 °С. Благодаря длине капилляра (до 60 м) они могут служить дистанционными термометрами. Шкала манометра, измеряющего давление в баллоне, градуирована непосредственно в °С

Жидкостные термометры имеют существенный недостаток — хрупкость и легко разбиваются, а ртутные термометры при этом еще и загрязняют окружающую среду. Поэтому в быту и инженерной

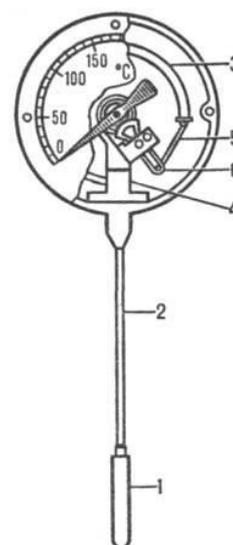


Рисунок 12.5. — Манометрический термометр

практике применяют так называемые металлические термометры, конструкция которых показана на рисунке 12.6.

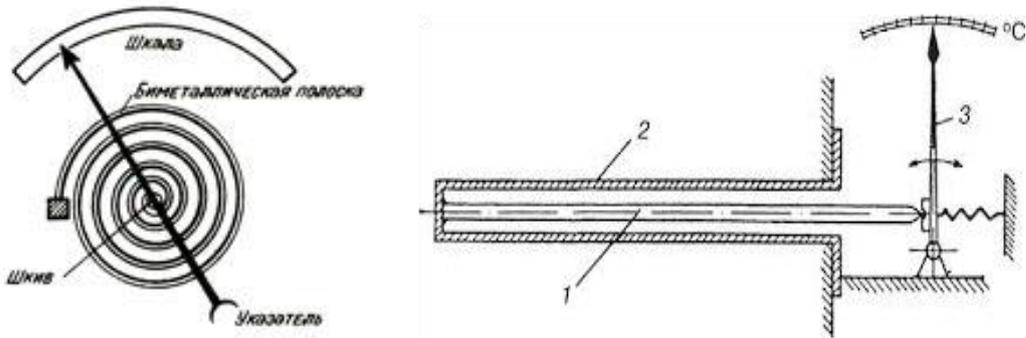


Рисунок 12.6. – Биметаллический (слева) и стержневой (справа) металлические термометры.

Биметаллическая пластинка выполнена в виде полосы, свернутой в спираль, которая закручивается сильнее при увеличении температуры или меньше – при уменьшении. На конце спирали укреплен стрелка, показывающая степень закручиваемости полоски, а следовательно, и температуру. Несмотря на не очень высокую точность (1-2 градуса) такие термометры получили широкое распространение в быту. <https://stroy-podskazka.ru/termometr/mechanicheskiy/>

Стержневой термометр обладает большей точностью и его принцип работы основан на измерении степени удлинения стержня при изменениях температуры. Точность измерения будет зависеть от длины показывающей стрелки. Такого рода термометры достаточно часто используются в аппаратуре регулировки температуры, где вместо стрелки устанавливаются электрические контакты.

### Тема 13 Применение электризации в технике. Применение законов Ома и Кирхгоффа в технике

Статическая электризация – это процессы, которые приводят к образованию, разделению и накоплению зарядов разных знаков. Такие взаимодействия стали привлекать внимание очень давно, но в последнее время это стало особенно актуальным, так как в промышленности стали применять материалы с высоким удельным объемным сопротивлением  $\rho_v \approx 10^{12}$  Ом·м и удельным поверхностным сопротивлением  $\rho_s \approx 10^{12}$  Ом. Эти материалы могут сохранять заряд в течение длительного времени, а значит, может накапливаться заряд, который увеличивает напряженность электрического поля. При этом могут возникнуть условия удовлетворяющие возникновению самостоятельного разряда, а значит, может образоваться электрическая искра (пробой промежутка).

Контакт двух твердых тел сопровождается возникновением на границе их соприкосновения двойного электрического слоя, что связано с обменом электрическими зарядами между телами. Переход зарядов с одного тела на другое возможен вследствие разницы в энергетическом состоянии взаимодействующих поверхностей, например, работ выхода электронов, температур, концентраций носителей электрического заряда и др. Электризуются, как правило, разнородные материалы. Однако образование двойных электрических слоев возможно при контакте тел и из одинаковых диэлектрических материалов за счет наличия на их поверхностях загрязнений, различной температуры тел и т.д. Обмен зарядами в ходе формирования двойного электрического слоя происходит в местах контактных точек соприкасающихся поверхностей. Трение способствует электризации тел за счет увеличения числа контактных точек и перехода работы трения в тепло, изменяющее энергетическое состояние взаимодействующих поверхностей. Находящиеся в контакте тела с образовавшимся на границе раздела двойным электрическим слоем остаются электрически нейтральными. После механического разделения каждое тело приобретает равные по величине электрические заряды противоположного знака. Плотность зарядов после разделения двойного электрического слоя становится меньше. Происходит это вследствие того, что в момент разделения двух поверхностей между ними образуются микрозаряды, которые нейтрализуют заряды двойного электрического слоя. Максимальная поверхностная плотность зарядов может быть  $26,5$  мкКл/м<sup>2</sup>, что соответствует предзарядной напряженности поля в зазоре между разделяющимися плоскими поверхностями при нормальных условиях  $3 \cdot 10^5$  кВ/м. Практически за счет локальной неоднородности поля,

обусловливающей микрозаряды, наибольшая плотность заряда обычно составляет около  $10 \text{ мкКл/м}^2$ . Таким образом, при разделении поверхностей разнородных материалов заряды статического электричества удерживаются на диэлектрических материалах и изолированных от земли проводниковых материалах.

<https://www.youtube.com/watch?v=K8RtC4lgDLQ>

[https://www.youtube.com/watch?v=dJiF\\_HrurPU&feature=emb\\_logo](https://www.youtube.com/watch?v=dJiF_HrurPU&feature=emb_logo)

Имеются упоминания о том, что еще в начале XV столетия в европейских крепостях соблюдались меры по защите от электростатики для предотвращения самовозгорания пороховых складов. На бумажных фабриках США к 60-м годам XIX века уже использовался метод ионизации пламенем для нейтрализации заряда бумажной ленты во время сушки. В настоящее время ионизация воздуха применяется в бумагообработке, полиграфии, производстве пресс-форм и литье под давлением, волоконной оптике, текстильной промышленности и др. Электронная промышленность занимает в этом списке одну из верхних строчек. <http://electrik.info/main/fakty/48-staticheskoe-jelektrichestvo-v-prirode.html>

и

<https://energiatrend.ru/news/staticheskoe-jelektrichestvo-v-bytu-i-na-proizvodstve>

Электризация диэлектрических материалов в производственных условиях породила ряд проблем, среди которых главными являются защита технологических процессов от разрядов статического электричества. Особенно опасны разряды, обладающие энергией  $0,01 \text{ мДж}$  и выше, в атмосфере, содержащей горючие вещества. Они могут стать причиной пожаров и взрывов особенно на производствах, где в воздухе образуется горючая пыль (угольная, древесная, мучная) или пары топлива. Заряды статического электричества вызывают также значительные технологические отклонения и помехи (рыхлость намотки нитей и тканей, биение рулона с диэлектрическими пленками, отталкивание красителей, прилипание пленок и бумаги к поверхностям машин и оборудования и т.д.). Заряды статического электричества оказывают физиологическое воздействие на организм человека за счет длительного протекания малого тока через тело человека, кратковременного, весьма ощутимого электрического разряда, электрического поля, действующего на организм человека.

**Приведите свои собственные наблюдения по электризации тел.**

Способы защиты от статического электричества могут быть условно разделены на две группы. К первой из них относятся способы, использование которых предотвращает накопление зарядов на взаимодействующих телах. Сюда входят: заземление металлических и электропроводных неметаллических элементов оборудования; увеличение поверхностной и объемной проводимости

диэлектриков за счет введения антистатических присадок, а также другие способы, в том числе подбор контактных пар. Заземление не является защитой от зарядов статического электричества, но оно необходимо для ограничения предельного заряда, который может накапливаться на изоляционных материалах и передаваться на проводящие конструкции установок.

[https://www.youtube.com/watch?v=N\\_kbXZIX3E4](https://www.youtube.com/watch?v=N_kbXZIX3E4)

Вторая группа способов, не исключая возможности накопления заряда, предотвращает нежелательное или опасное их проявление. Таким способом является увеличение проводимости диэлектрических материалов.

1) Использование поверхностно активных веществ – ПАВ. Диэлектрические вещества покрывают пленкой ПАВов, имеющих высокую проводимость (антистатики). Недостатком является ухудшение действия ПАВов со временем.

2) Антистатические присадки, добавляемые в диэлектрические вещества и влияющие на их объемную проводимость. Добавляются в жидкие топлива, могут добавляться и в твердые материалы. Например, в полиэтилен добавляют сажу. Недостатком является влияние присадок на структуру веществ, ухудшая их качество.

3) Увлажнение воздуха. Наличие паров воды в воздухе более 70% приводит к быстрому стеканию зарядов статического электричества, благодаря появлению пленки влаги на поверхности. Этот способ проще, но он нередко влечет вторичные проблемы, такие как дискомфорт персонала, коррозия металлов и ухудшение паяемости. Оптимальная относительная влажность воздуха обычно не превышает 55%, хотя это во многом зависит от специфики производства. В частности, на бывшем когда-то в г. Костанай, одном из самых крупных в СССР камвольно-суконном комбинате (КСК) в начале применялась именно такая система борьбы с электризацией пряжи. Однако это вызывало чрезвычайно тяжелые условия труда и приводило к необходимости сушить готовую продукцию. Позже система увлажнения воздуха водяным паром была заменена на радиационные ионизаторы воздуха.

Тем не менее, поддержание оптимального уровня влажности является лишь благоприятным фоном, тогда как наиболее действенным способом нейтрализации заряда на диэлектриках является именно ионизация воздуха. В этом случае задача решается установкой на технологическом оборудовании нейтрализаторов зарядов статического электричества.

Для того чтобы эффективно нейтрализовать заряд на диэлектрике, необходимо увеличить проводимость окружающего воздуха. Всем нам случалось видеть, как воздушный шарик,

прилипший к стене под действием статического электричества, через какое-то время неизбежно падает. Это обусловлено тем, что воздух является проводником, через который постепенно стекает заряд статического электричества. Чем меньшей проводимостью обладает воздух, тем медленнее нейтрализуется заряд и дольше висит воздушный шарик. Пассивный нейтрализатор статических зарядов (рисунок 13.1) образует заряды на

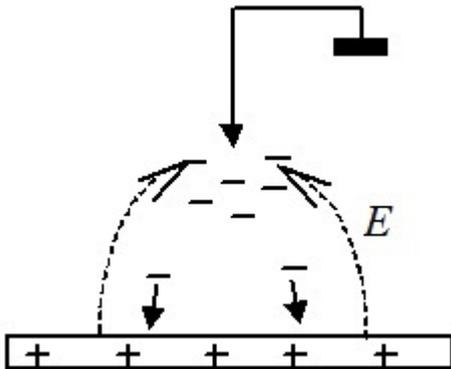


Рисунок 13.1 – Пассивный нейтрализатор статических зарядов

металлических острях, установленных вблизи электризуемого объекта. Индуцируемый заряд ионизирует прилегающий воздух. Ионы, имеющие противоположную полярность зарядов наэлектризованного материала, под действием электрического поля оседают на поверхности диэлектрика, нейтрализуя его. Эффективность такого устройства зависит от многих факторов, в том числе и от

обслуживания устройства. Поэтому на производстве чаще применяются активные ионизаторы.

Ионизатор посредством источника высокого напряжения (ИВН) генерирует мощный поток положительно и отрицательно заряженных ионов, которые, притягиваясь к молекулам противоположной полярности, нейтрализуют статический заряд на объектах рабочей зоны (рисунок 13.2).

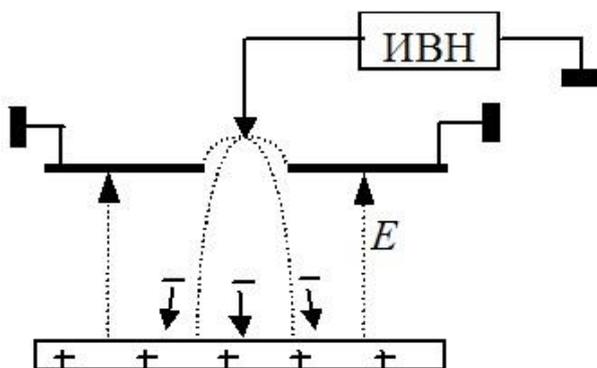


Рисунок 13.2 – Активный ионизатор воздуха.

Для доставки ионов на рабочие поверхности объектов ионизаторы обычно оснащаются встроенным вентилятором. В промышленности наиболее широко используются коронные (игольчатые) ионизаторы трех разновидностей.

<https://yato-tools.ru/raznoe/elektrostaticheskoe-elektrichestvo-cto-eto-takoe-polza-i-vred-staticheskogo-napryazheniya.html>

Ионизация молекул воздуха с образованием "+" и "-" ионов происходит и за счет энергии радиоактивного  $\alpha$  или  $\beta$  излучения. В зависимости от знака заряда на изделии под действием электрического поля, создаваемого этим зарядом, к поверхности изделия движутся ионы противоположного знака.



Рисунок 13.3. – Действие радиоактивного нейтрализатора статического электричества

Недостатком радиоактивных нейтрализаторов является малый ионизационный ток по сравнению с другими нейтрализаторами (рисунок.13.3.).

Наряду с отрицательным влиянием электростатических полей на технологические процессы существуют такие, которые немислимы без применения высоковольтного электрического поля. Рассмотрим вкратце некоторые из них. Окрашивание в электрическом поле

Сущность метода окрашивания в электрическом поле высокого напряжения, заключается в распылении лакокрасочного материала (ЛКМ) с одновременным сообщением частицам лакокрасочного материала электрического заряда (обычно отрицательного )



Рисунок 13.4. – Окрашивание в электростатическом поле

Благодаря приобретённому заряду, частицы ЛКМ перемещаются в электрическом поле, которое создаётся между распылителем и окрашиваемым изделием (рисунок.13.4). В итоге, частицы лакокрасочного материала равномерно осаждаются на поверхности противоположно заряженного (заземлённого ) изделия.

В электрическом поле высокого напряжения обычно окрашивают металлические изделия. Однако, этим способом можно окрашивать также и неметаллические изделия. В этом случае добиваются минимально необходимой электропроводности различными способами: <https://helpiks.org/6-88194.html> Достоинства метода:

- экономичность (потери ЛКМ не превышают 5%);
- высокое качество получаемых покрытий;

- возможность окрашивания изделий из различных материалов;
- возможность полной автоматизации процесса окрашивания;
- хорошие санитарно-гигиенические условия труда.

Хорошо известно, что лакокрасочные покрытия плохо противостоят истирающим нагрузкам. Поэтому в ряде случаев применяют так называемые порошковые покрытия, образующие на поверхности изделия прочную пластмассовую пленку, хорошо противостоящую внешним воздействиям. Технология нанесения порошковых покрытий и краски в электрическом поле находит широкое применение практически во всех областях промышленного производства, где нужно получать защитные, декоративные, электроизоляционные, химически стойкие и др. покрытия. <https://prelektro.ru/article/poroshkovaja-okraska/> . Технологический процесс получения покрытий заключается в сообщении электрического заряда частицам диэлектрического порошкового материала или аэрозоли краски, осаждение их под действием электрических сил из аэрозольного облака, окружающего заземленное изделие и закрепление нанесенного слоя. Сформированное порошковое покрытие в результате последующей термообработки расплавляется, спекается или полимеризуется и превращается в монолитную пленку.

Порошковые покрытия дают экономическую выгоду производителю до 30 % по сравнению с покрытиями, получаемыми с помощью жидких лакокрасочных материалов. Они существенно улучшают эксплуатационные характеристики изделий с покрытиями. Преимущества обеспечиваются за счет:

- практически полного отсутствия потерь покрывного материала;
- исключения из технологии окраски дорогостоящих и загрязняющих окружающую среду растворителей;
- возможности получения покрытия толщиной 40 мкм и выше за один цикл напыления;
- возможности получения покрытий с новыми, более высокими эксплуатационными характеристиками за счет применения в качестве покрывного материала веществ и соединений, которые переработать в покрытие можно только с использованием порошковой технологии;
- высокой производительности, улучшения условий труда и др.

В технологии напыления порошковых покрытий в настоящее время используются следующие материалы: эпоксидные смолы, эпоксиполиэфиры, полиэтилены, пентопласты, фторопласты, акрилы, поливинилбутираль, стеклоэмали и др. <https://www.youtube.com/watch?v=d5ahP9EzfDY>

Еще одна технология, почти невозможная без применения электричества это электросепарация – разделение смеси веществ на составляющие. Электросепарация основана на том, что различие в физических свойствах приводит к различию в поведении отдельных компонентов смеси в электрическом поле.

Электрическую сепарацию применяют для сыпучих материалов крупностью до 5 мм, переработка которых другими методами малоэффективна (компоненты близки по плотности, магнитным или физическими свойствам). В настоящее время ее используют для обогащения и доводки гравитационных концентратов руд черных и цветных металлов, в алмазной, стекольной, керамической промышленности, при обогащении углей, формовочных песков и в других случаях. Методами электрической сепарации обогащают только сухие материалы, поэтому данные способы особенно перспективны в маловодных районах.

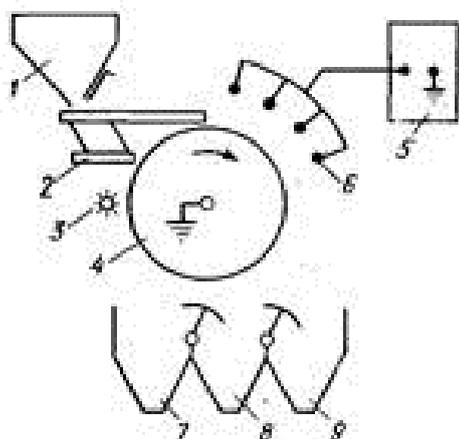


Рисунок 13.5. –

Принципиальная схема электрического сепаратора с коронирующей системой: 1-бункер; 2-вибропитатель; 3-щетка; 4-вращающийся заземленный барабан; 5-источник высокого напряжения; 6-коронирующие электроды; 7,8,9-бункеры.

Эти методы основаны на разнице в поведении заряженных частиц в электрическом поле или на заряженном электроде, обусловленной их различием в электропроводности. Как известно, все тела по электропроводности делятся на проводники тока, полупроводники и непроводники (диэлектрики). В случае движения по заряженному электроду в целом электронейтральные электропроводящие частицы отдают ему заряд противоположного знака и сохраняют одноименный с электродом заряд. Последнее

приводит к отталкиванию частицы от электрода. Диэлектрик, напротив, взаимодействует с электродом частицами противоположного знака, прилипает к нему.

Обычно электрод имеет форму заземленного вращающегося барабана, лежащего в основе конструкции электростатического барабанного сепаратора, схема разделения частиц в котором сходна с таковой для магнитных сепараторов. При загрузке, например, сверху на вращающийся барабан частицы проводники отталкиваются от барабана и попадают в ближний бункер. Минералы диэлектрики

прилипают к барабану и вращаются вместе с ним до скребка на противоположной стороне барабана, где отделяются и поступают в дальний бункер. Полупроводниковые частицы скапливаются в среднем бункере (рисунок 13.5).

Одним из наиболее совершенных способов очистки промышленных газов от твердых и жидких частиц является очистка в электрофильтрах.

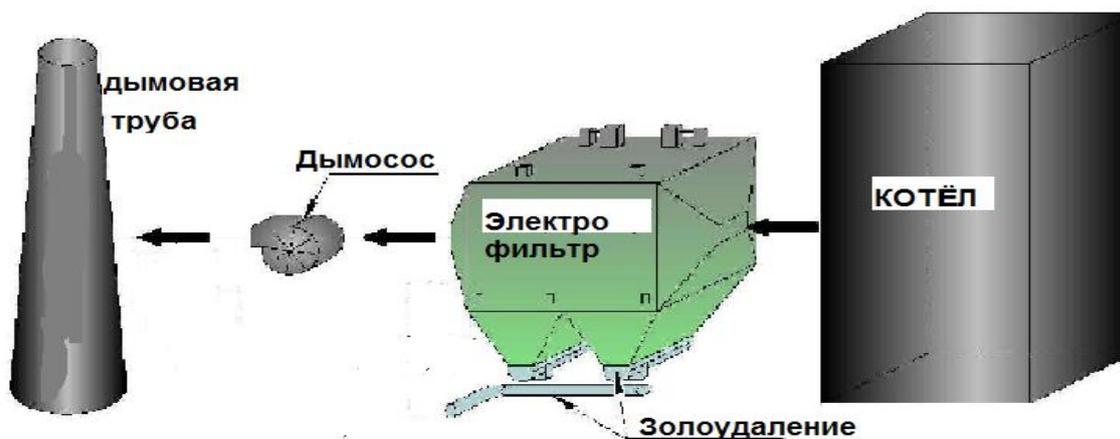


Рисунок.13.6. – Схема дымоудаления с электрофильтром

Электрофильтр (рисунок 13.6.) это устройство, в котором очистка газов от аэрозольных, твердых или жидких частиц происходит под действием электрических сил. В результате действия электрического поля заряженные частицы выводятся из очищаемого газового потока и осаждаются на электродах. Зарядка частиц происходит в поле коронного разряда. [https://www.youtube.com/watch?v=3KUFH9v\\_5tA](https://www.youtube.com/watch?v=3KUFH9v_5tA) . Электрофильтр представляет собой корпус прямолинейной или цилиндрической формы, внутри которого смонтированы осадительные и коронирующие электроды различной конструкции (в зависимости от назначения и области применения электрофильтра, а также от специфики улавливаемых частиц). Коронирующие электроды подключены к высоковольтному источнику питания выпрямленным током напряжением 50-60 кВ и выше. Электрофильтры, в которых улавливаемые твердые частицы удаляются с электродов встряхиванием, называются сухими, а те, в которых осажённые частицы смываются с электродов жидкостью или улавливаются жидкие частицы (туман, брызги), — мокрыми.

<https://www.youtube.com/watch?v=rIb8wcADbMY>

<https://www.youtube.com/watch?v=rIb8wcADbMY>

Электрофильтры, оказывая малое аэродинамическое сопротивление потоку газа, обеспечивают высокую степень очистки,

пригодны для использования в самых различных условиях, в том числе при высокой температуре и для химически активных газов. Они применяются в цементной, химической, металлургической промышленности, на тепловых электростанциях.

Электрографический способ воспроизведения изображений один из прогрессивных и эффективных методов копирования, размножения документации и печатной продукции.  
[https://www.youtube.com/watch?v=ffFpuu5LGVk&feature=emb\\_logo](https://www.youtube.com/watch?v=ffFpuu5LGVk&feature=emb_logo)

В основе этого способа лежит свойство высокоомного полупроводника, нанесенного тонким слоем на подложку, изменять свою электрическую проводимость под действием света. Электрофотографические процессы состоят из нескольких последовательных стадий.

Перед экспонированием барабан, покрытый слоем специального материала (селена или другого аналогичного по свойствам вещества, способного воспринимать электростатический заряд), подвергается воздействию коронного разряда. Селеновая поверхность (фоторецептор) приобретает определенный заряд, т.е. по аналогии с фотопроцессами можно сказать, что она приобретает светочувствительность.

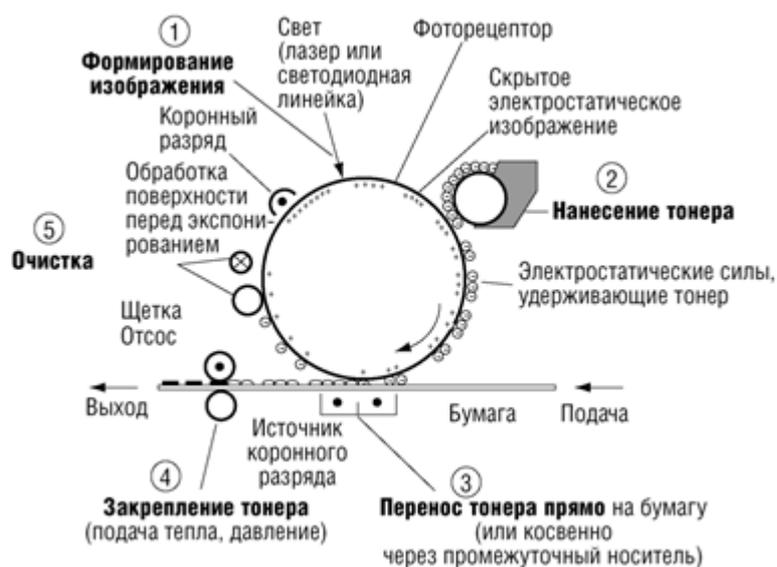


Рисунок. 13.7. – Схема электрографического процесса

#### А. Формирование изображения

«Скрытое» изображение получают на поверхности фоторецептора с помощью управляемого компьютером источника света (лазер или светодиодная линейка). При попадании светового потока на поверхность фоторецептора происходит изменение заряда

отдельных участков. На те участки, куда попал световой поток, происходит «выбивание» электростатического заряда.

#### Б. Нанесение тонера

Для электрофотографии применяют специальные красящие материалы, называемые тонером. Это могут быть порошковые или жидкие тонеры, которые различны по своему составу и содержат цветной пигмент. Нанесение тонера происходит с помощью систем, обеспечивающих перенос мелких частиц тонера (размером от 6 до 8 мкм) на фоторецептор. Частицы тонера попадают на заряженные участки поверхности фотополупроводникового слоя и закрепляются на тех участках, где световой поток не убрал заряд с поверхности, при этом частички тонера, в свою очередь, приобретают определенный электростатический заряд. Таким образом, происходит формирование изображения. После нанесения тонера на поверхность фоторецептора скрытое электростатическое изображение становится видимым.

#### В. Перенос тонера (печать)

Тонер может переноситься прямо на бумагу или же на промежуточную систему, например в виде цилиндра или ленты. Как показано на рисунке 6.13, в большинстве случаев тонер передается прямо с фоторецептора на запечатываемый материал. Чтобы перенести заряженные частицы тонера с поверхности барабана на бумагу, необходимы электростатические силы. Они создаются источником коронного разряда с одновременным прижимом бумаги к барабану. Заряженные частички пигмента под действием электростатических сил переносятся на поверхность бумаги.

Наиболее простой и распространенный способ фиксации изображения - термический при соответствующем подборе порошка и температуры (85 - 100° С). Возможна фиксация порошка давлением или комбинированным воздействием.

[http://servplus.info/stat\\_i/lazernaya\\_pechat\\_kak\\_eto\\_rabotaet](http://servplus.info/stat_i/lazernaya_pechat_kak_eto_rabotaet)

Завершающий этап является вспомогательным и заключается в очистке фотослоя от остатков порошка и подготовке к новому циклу.

### **Применение законов Ома и Кирхгофа в технике**

При изучении физики в большинстве случаев при рассмотрении электрических цепей мы считаем проводники не имеющими электрического сопротивления, по крайней мере, считаем его исчезающе малым. Как известно – это не так. Закон Ома гласит:  $I=U/R$ , то есть ток равен напряжению деленному на сопротивление. Или наоборот:  $U=I*R$ , то есть напряжение равно току умноженному на сопротивление. Одно из неприятных проявлений этого закона - падение напряжения на токоведущих проводах, про сопротивление

которых забыли. Как проявляет себя это сопротивление на практике проще всего рассмотреть на конкретном примере.

Рассмотрим сопротивление самого проводника. В электротехнике и быту наибольшее распространение получили провода из меди и алюминия. Удельное сопротивление меди равно  $17 \text{ нОм} \cdot \text{м}$ , а алюминия –  $26 \text{ нОм} \cdot \text{м}$ . Вспомним, что сопротивление проводника определяется по формуле:

$$R = \rho l/S, \quad (13.1)$$

где  $\rho$ - удельное сопротивление провода,  $l$  - длина провода,  $S$  – площадь поперечного сечения провода.

Приведенные выше значения удельного сопротивления меди и алюминия относятся к чистой электротехнической меди и алюминию. В процессе изготовления проводов они загрязняются и удельное сопротивление несколько возрастает, примерно до 20 и 30  $\text{нОм} \cdot \text{м}$  соответственно. Это означает, что медный провод сечением  $1 \text{ мм}^2$  и длиной 100 метров будет иметь сопротивление около 2 Ом. Это сопротивление зависит от технологии производства провода и его температуры, а также от степени помятости провода, усилия натяжения, но для простоты рассуждений будем считать - 2 Ома. Такой же алюминиевый провод будет иметь сопротивление 3 Ома. На практике провода сечением  $1 \text{ мм}^2$  встречаются не так уж часто, но для наших рассуждений это не должно быть помехой так как пересчитать сопротивление для провода другого сечения нетрудно. Предположим нам необходимо запитать видеокамеру наружного наблюдения, удаленную от поста на 150 м. Воспользуемся широко известным телефонным проводом сечением  $0.2 \text{ мм}^2$ . Это в пять раз тоньше, поэтому сопротивление будет в пять раз больше нашей исходной цифры - 10 Ом. Общая длина провода до видеокамеры составила 300 метров. ***Почему длина провода больше расстояния до видеокамеры?*** Значит, сопротивление провода будет ещё больше - 15 Ом. Напряжение питания видеокамеры 12 Вольт, потребляемый ток 300 мА. В соответствии с законом Ома получаем падение напряжения 9 Вольт. (Питание подведено двумя проводами, по обоим идёт ток и на каждом из них упадёт по четыре с половиной вольта). То есть падение напряжения на проводах составило 9 вольт, а для камеры из поданных 12 Вольт осталось всего только 3 Вольта. Результат - камера не работает. Что же делать? Можно взять источник питания напряжением побольше, чтобы хватило и на паразитное падение на проводах и на камеру осталось, сколько положено. В нашем примере - 21 Вольт.

[https://www.youtube.com/watch?v=AoQxuSGIFMQ&feature=emb\\_logo](https://www.youtube.com/watch?v=AoQxuSGIFMQ&feature=emb_logo)

На самом деле в паспорте указан максимальный ток потребления, а если объектив с автодиафрагмой неподвижен, и весь экран тёмный (а именно это случится первым же вечером), то потребление может оказаться намного меньше, например 100 мА. Теперь на проводах почти ничего не теряется, а, значит, на долю камеры останется 18 вольт. Такое напряжение может вывести камеру из строя.

Поэтому прежде, чем прокладывать провода необходимо сделать расчет. В том же паспорте указан допустимый разброс напряжения питания. Обычно это  $\pm 15\%$ , то есть - от 10 до 14 Вольт. Возьмём источник питания 14 Вольт, в таком случае напряжение на камере не превысит допустимого. Теперь посчитаем падение напряжения на проводах: в самом худшем случае для камеры должно остаться 10 Вольт, а значит, на проводах питания может упасть не более чем по два вольта на каждом. Из закона Ома найдем, что падение напряжения в два вольта при максимальном токе (300 мА) означает допустимое сопротивление провода около 6 Ом. Это для нашего реального случая - для провода 150 метров длиной. Это значит, нужен провод с погонным сопротивлением не хуже чем 4 Ома на 100 метров. Вспоминаем - 2 Ома на 100 метров для провода сечением  $1\text{мм}^2$  и видим, что нам нужен провод вдвое тоньше - сечением  $0.5\text{мм}^2$ . То есть более толстый, конечно, тоже годится, но это будет дороже и не оправдано экономически. Да и выбрано все это в качестве примера. <https://www.youtube.com/watch?v=eb51FuiSSq4>

***Рассчитайте необходимое сечение провода для передачи напряжения 24 вольта для электромотора открывания ворот, находящихся рядом с камерой (150 метров), если электродвигатель в момент пуска потребляет 15 Ампер, а в рабочем режиме 8 Ампер. Можно ли поставить сюда провод сечением  $1\text{мм}^2$  ?***

Итак, толстые провода нужны потому, чтобы на них не осуществлялось большое падение напряжения. Вспомним закон **Джоуля — Ленца**. Кроме своего очень широкого диапазона применения закон интересен еще и выводом, который из него следует. Сопоставим найденную по нему теплоту  $Q$ , выделившуюся на сопротивлении  $R$  при протекании по нему тока  $i$ , с работой по перенесению заряда  $q$ :

$$Q = i^2 Rt; \quad A = qU = itU. \quad (13.2)$$

Заменив в последнем равенстве напряжение через силу тока и сопротивление, получим выражение, эквивалентное первому. Получается, что работа по перемещению заряда в поле целиком идет на выделившееся тепло. Как и закон Ома, закон Джоуля — Ленца является экспериментальным. Его также можно представить в дифференциальной форме. Удельная мощность тока  $w$  прямо пропорциональна квадрату напряженности электрического поля в проводнике.

$$w = \frac{dQ}{dVdt} = \rho \cdot j^2 = jE = \frac{E^2}{\rho} \quad (13.3)$$

Из этой формулы видно, что количество тепла, выделившегося в проводнике с удельным сопротивлением  $\rho$  пропорционально квадрату плотности тока  $j$ , которая зависит обратно пропорционально от площади поперечного сечения проводника. Этим пользуются для защиты потребителей от перегрузок и коротких замыканий, устанавливая в цепи последовательно проводник малого сечения — предохранитель, который в этом случае будет называться плавким.

<https://www.asutpp.ru/chto-takoe-korotkoe-zamykanie.html>

**Почему опасны короткие замыкания?**

[https://www.youtube.com/watch?v=HZDA1j3D-zs&feature=emb\\_logo](https://www.youtube.com/watch?v=HZDA1j3D-zs&feature=emb_logo)

**Сделайте расчет сечения плавкого предохранителя из алюминиевой проволоки, если он должен сгореть при токе 25 Ампер за 0,5 сек. Оцените величину нагрева проводов. Недостающие данные выберите сами.**

Фундаментальный закон природы - **закон сохранения заряда**: алгебраическая сумма электрических зарядов любой замкнутой системы (системы, не обменивающейся зарядами с внешними телами) остается неизменной, какие бы процессы ни происходили внутри этой системы.

Классическим проявлением выражения закона сохранения заряда служит первый закон Кирхгофа, а второй является следствием закона Ома.

Оба эти закона являются основополагающими при электротехнических расчетах.

Весьма интересно и поучительно проявляют себя законы Кирхгофа применительно к электрическим схемам транспортных средств.

Все дело в том, что электрические схемы транспортных средств устроены по однопроводной схеме. Роль второго провода выполняет корпус транспортного средства. К примеру, все потребители

электрического тока на современном автомобиле делятся на группы защищаемые одним предохранителем, а второй провод этих потребителей соединен с корпусом «массой». Соединение же с массой подвержено всякого рода коррозии или неплотностям, обладающем повышенным сопротивлением. Вследствие этого возникают явления, плохо поддающиеся диагностированию и объяснению, когда из-за блуждания тока начинают работать неподключенные потребители и наоборот. <https://avtoelektrik-info.ru/zap-chasti/79-provodka-v-mashine>

Если во внешнее электростатическое поле внести нейтральный проводник, то свободные заряды (электроны, ионы) будут перемещаться: положительные — по полю, отрицательные — против поля. На одном конце проводника будет скапливаться избыток положительного заряда, на другом — избыток отрицательного. Эти заряды называются **индуцированными**.

<https://www.youtube.com/watch?v=DcreB5Kizqo>

Процесс будет происходить до тех пор, пока напряженность поля внутри проводника не станет равной нулю, а линии напряженности вне проводника — перпендикулярными его поверхности. Таким образом, нейтральный проводник, внесенный в электростатическое поле, разрывает часть линий напряженности; они заканчиваются на отрицательных индуцированных зарядах и вновь начинаются на положительных. Индуцированные заряды распределяются на внешней поверхности проводника. Явление перераспределения поверхностных зарядов на проводнике во внешнем электростатическом поле называется **электростатической индукцией**.

Так как в состоянии равновесия внутри проводника заряды отсутствуют, то создание внутри него полости не повлияет на конфигурацию расположения зарядов и тем самым на электростатическое поле. Следовательно, внутри полости поле будет отсутствовать. Если теперь этот проводник с полостью заземлить, то потенциал во всех точках полости будет нулевым, т. е. полость полностью изолирована от влияния внешних электростатических полей. На этом основана **электростатическая защита** — экранирование тел, например измерительных приборов, от влияния внешних электростатических полей. Вместо сплошного проводника для защиты может быть использована густая металлическая сетка (клетка Фарадея <https://www.youtube.com/watch?v=dyIRqkdgnW4> ), которая, кстати, является эффективной при наличии не только постоянных, но и переменных электрических полей. <https://www.youtube.com/watch?v=iMjmdk535cc>

## Тема 14 Магнитные свойства тока. Электромагнитная индукция. Эффект Холла. Электромагниты и их применение в автоматике и в технике.

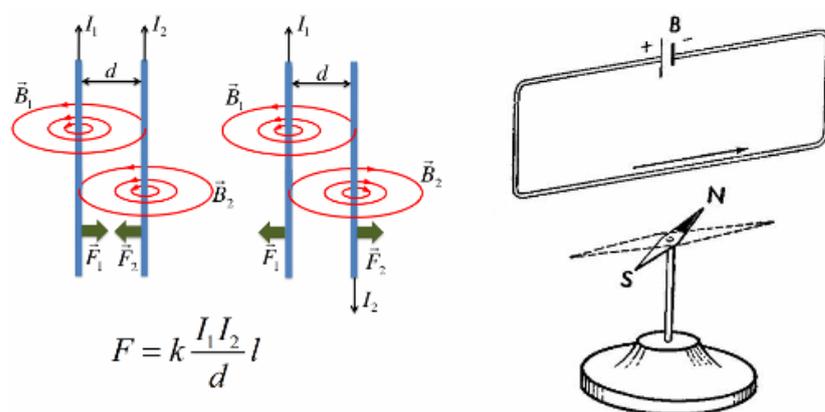
При наличии электрического тока в любом проводнике (в твердом, жидком или газообразном) наблюдается магнитное поле вокруг проводника, то есть проводник с током приобретает магнитные свойства.

Так, если к проводнику, по которому течет ток, поднести магнит, например в виде магнитной стрелки компаса, то стрелка повернется перпендикулярно проводнику, а если намотать проводник на железный сердечник, и пропустить по проводнику постоянный ток, то сердечник

станет

электромагнитом.

<https://www.youtube.com/watch?v=qL-WlnjJYwQ>



$$F = k \frac{I_1 I_2 l}{d}$$

Рисунок 14.1. – Магнитное действие тока между проводниками и действие тока на магнитную стрелку.

В 1820 году Эрстед открыл магнитное действие тока на магнитную стрелку, а Ампер установил количественные закономерности магнитного взаимодействия проводников с

током. Магнитное поле всегда порождается током, то есть движущимися электрическими зарядами, в частности - заряженными частицами (электронами, ионами). Противоположно направленные токи взаимно отталкиваются, однонаправленные токи взаимно притягиваются.

Существуют магниты двух разных видов. Одни – так называемые постоянные магниты, изготавливаемые из «магнитно-твердых» материалов. Их магнитные свойства не связаны с использованием внешних источников или токов. К другому виду относятся так называемые электромагниты с сердечником из «магнитно-мягкого» железа. Создаваемые ими магнитные поля обусловлены в основном тем, что по проводу обмотки, охватывающей сердечник, проходит электрический ток.

Магнитные свойства стержневого магнита наиболее заметны вблизи его концов. Если такой магнит повесить за среднюю часть

так, чтобы он мог свободно поворачиваться в горизонтальной плоскости, то он займет положение, примерно соответствующее направлению с севера на юг. Конец стержня, указывающий на север, называют северным полюсом, а противоположный конец – южным полюсом. Разноименные полюса двух магнитов притягиваются друг к другу, а одноименные взаимно отталкиваются.

Если к одному из полюсов магнита приблизить брусок не намагниченного железа, то последний временно намагнитится. При этом ближний к полюсу магнита полюс намагниченного бруска будет противоположным по наименованию, а дальний – одноименным. Притяжением между полюсом магнита и индуцированным им в бруске противоположным полюсом и объясняется действие магнита. Некоторые материалы (например, сталь) сами становятся слабыми постоянными магнитами после того, как побывают около постоянного магнита или электромагнита. Стальной стержень можно намагнитить, просто проведя по его торцу концом стержневого постоянного магнита. <https://www.youtube.com/watch?v=t1-YdA5Zwrg>

Итак, магнит притягивает другие магниты и предметы из магнитных материалов, не находясь в соприкосновении с ними. Такое действие на расстоянии объясняется существованием в пространстве вокруг магнита магнитного поля. Некоторое представление об интенсивности и направлении этого магнитного поля можно получить, насыпав на лист картона или стекла, положенный на магнит, железные опилки. Опилки выстроятся цепочками в направлении поля, а густота линий из опилок будет соответствовать интенсивности этого поля. (Гуще всего они у концов магнита, где интенсивность магнитного поля наибольшая.)

Плотность магнитного потока, или магнитная индукция ( $B$ ), равна числу линий индукции, проходящих по нормали через элементарную площадку единичной величины.

Магнитной индукцией определяется сила, с которой магнитное поле действует на находящийся в нем проводник с током. Если проводник, по которому проходит ток  $I$ , расположен перпендикулярно линиям индукции, то по закону Ампера сила  $F$ , действующая на проводник, перпендикулярна и полю, и проводнику и пропорциональна магнитной индукции, силе тока и длине проводника. [http://fizmat.by/kursy/magnetizm/sila\\_Ampera](http://fizmat.by/kursy/magnetizm/sila_Ampera)

Благодаря силе Ампера, действующей на проводник с током в магнитном поле существуют технические устройства – электродвигатели, без которых невозможно представить современное производство и нашу жизнь. <https://powercoup.by/kak-eto-ustroeno/printsip-raboty-elektrodvigatelya>

Для магнитной индукции  $B$  можно написать выражение

$$B = \frac{F}{Il}, \quad (14.1)$$

где  $F$  – сила в ньютонах,  $I$  – ток в амперах,  $l$  – длина в метрах. Единицей измерения магнитной индукции является тесла (Тл)

Фарадей считал, что не только электрические, но и магнитные поля – это силовые линии, заполняющие пространство. Число силовых линий магнитного поля, пересекающих произвольную поверхность  $s$ , соответствует величина  $F$ , которая называется магнитным потоком:

$$\Phi = \int_s B_n ds, \quad (14.2)$$

где  $B_n$  – проекция магнитного поля  $B$  на нормаль к элементу площади  $ds$ . Единица измерения магнитного потока называется вебером (Вб);  $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2$ .

Фарадеем был сформулирован закон об ЭДС, наводимой в замкнутом витке провода изменяющимся магнитным полем (закон магнитной индукции). Согласно этому закону, такая ЭДС пропорциональна скорости изменения полного магнитного потока через виток. В системе единиц СИ коэффициент пропорциональности равен 1 и, таким образом, ЭДС (в вольтах) равна скорости изменения магнитного потока (в Вб/с). Математически это выражается формулой

$$\mathcal{E} = -d\Phi / dt, \quad (14.3)$$

где знак минус показывает, что магнитные поля токов, создаваемых этой ЭДС, направлены так, что уменьшают изменение магнитного потока. Иначе, наведенная ЭДС направлена так, что противодействует вызывающей ее появление причине. Если катушка состоит из  $N$  витков провода, каждый из которых пронизывается магнитным потоком  $F$ , то

$$\mathcal{E} = -Nd\Phi / dt. \quad (14.4)$$

Это соотношение справедливо независимо от того, по какой причине изменяется пронизывающий цепь магнитный поток. <https://www.youtube.com/watch?v=2oKBbt8W7PM> . благодаря явлению электромагнитной индукции работают очень большое количество технических устройств. В частности это генераторы электрического тока, благодаря которым существует электрический ток, различные трансформаторы, регуляторы и прочие, а так же устройства, преобразующие скорость вращения механических роторов в электрический ток, пропорциональный скорости. Это позволяет

истанционно измерять как скорость вращения так и число оборотов этих роторов. Например, так устроен тахометр, спидометр и одометр любого автомобиля.

**Рассмотрите в Интернете работу этих устройств.**

Наиболее простым устройством, нашедшим широкое применение, является *электромагнит*. Его действие основано на явлении существования магнитного поля вокруг проводника с током и на свойствах ферромагнетиков.

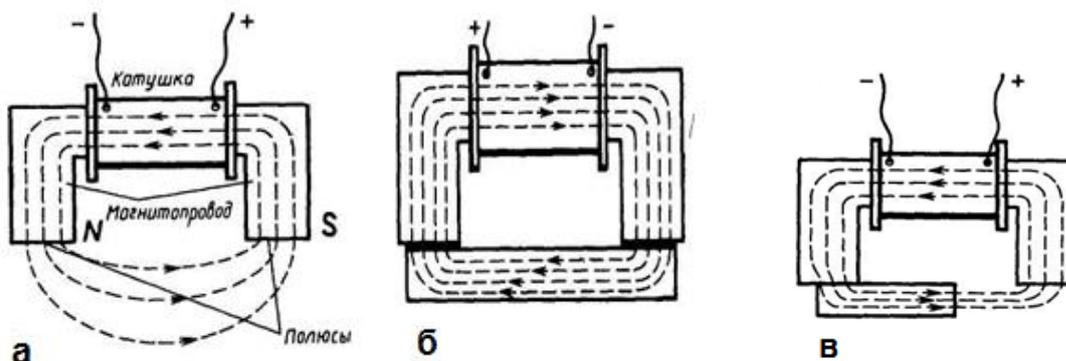


Рисунок 14.2. – Электромагнит

Электромагнит представляет собой проволочную катушку, насаженную на магнитопровод (рисунок. 14.2 а). Концы магнитопровода являются полюсами электромагнита. Если магнитопровод имеет форму, показанную на рисунке 14.2, то притянутый к ним ферромагнетик может либо совсем замкнуть магнитопровод (рисунок 14.2б), либо оставить некоторый зазор (рисунок 14.2в).

Если магнитопровод окажется замкнутым, то сила, с которой ферромагнетик притягивается к магнитопроводу, будет наибольшей. Важнейшим свойством электромагнита (по сравнению с постоянным магнитом) является исчезновение или значительное уменьшение этой силы после выключения тока в катушке. На этом свойстве основано действие электромагнитных кранов, с помощью которых осуществляется транспортировка стальных предметов и изделий без использования механических способов крепления.

Оно же лежит в основе применения электромагнитов в специальных устройствах, используемых в автоматике. В них к полюсам электромагнита притягиваются не посторонние ферромагнитные предметы, а специальная ферромагнитная пластина, которая называется *якорем*. Через якорь замыкается магнитный поток электромагнита. Притяжение якоря к полюсам электромагнита используется для выполнения какого-либо действия, например для замыкания или размыкания контактов.

Особенностью электромагнитов с притяжным якорем является малый ход самого якоря. Поэтому такие электромагниты почти не применяются в качестве исполнительных органов, но применяются в разнообразных устройствах, где достаточным является небольшой ход якоря.

Магнитопровод и якорь изготавливаются из магнитомягкой стали, характеризующейся малой остаточной намагниченностью<sup>1</sup>.

Специальные виды магнитомягкой стали, наоборот, характеризуются большой остаточной намагниченностью и используются, например, для изготовления постоянных магнитов

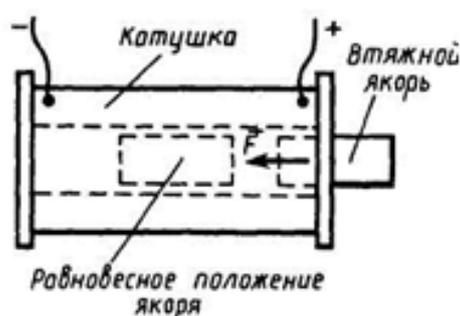


Рисунок 14.3 – Электромагнит с втяжным якорем

После выключения электрического тока в катушке магнитопровод и якорь практически полностью размагничиваются и сила притяжения якоря к полюсам магнитопровода почти целиком исчезает.

Находят применение электромагниты с втяжным якорем (рисунок 14.3). У таких электромагнитов нет замкнутого магнитопровода. Втяжной якорь

находится в устойчивом равновесном положении, если его концы равноудалены от середины катушки. Если же сердечник выведен из этого положения, то на него действует со стороны магнитного поля катушки сила, направленная в сторону равновесного положения. Электромагниты такого типа отличаются большим ходом якоря. Это *тяговые электромагниты*, которые используются в качестве привода исполнительных органов автоматических устройств. <https://www.youtube.com/watch?v=OiYVyrSkUpM>

Рассматривая действие различных электромагнитных устройств, необходимо руководствоваться следующим общим принципом: результатом взаимодействия электромагнита и якоря всегда является такое их относительное размещение, при котором магнитный поток оказывается максимальным. В соответствии с этим принципом в результате перемещения якоря (поступательного или вращательного) воздушный зазор в магнитопроводе должен стать минимальным. Именно в этом случае магнитный поток будет иметь наибольшее значение.

В электроавтоматике слабые сигналы, исходящие от датчиков, должны управлять работой достаточно мощных исполнительных органов: включать их или выключать. Это очень часто осуществляется при помощи особых устройств — реле. Реле

одновременно входит в две электрические цепи (Рисунок. 53): в слаботочную электрическую цепь управления и исполнительную цепь, в которую включен потребитель большой мощности — исполнительный орган. Реле позволяет с помощью слабого тока замкнуть или разомкнуть цепь, где протекает ток большой мощности <https://homius.ru/что-такое-реле.html>

Применение реле имеет большое значение также при управлении мощным исполнительным органом, находящимся на большом расстоянии от датчика или от коммутационного устройства (Рисунок. 54). В этом случае протяженной является управляющая слаботочная цепь. Потери энергии в этой цепи из-за малого значения силы тока будут незначительными. Небольшими они будут и в исполнительной цепи, так как длина проводов небольшая и, следовательно, невелико их сопротивление.

<https://electrosam.ru/glavnaja/jelektrooborudovanie/rozetki-vykljuchateli/elektromagnitnye-rele/>

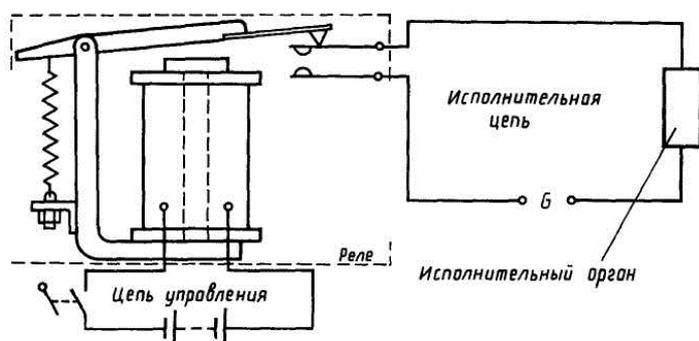


Рисунок. 14.4. – Подключение сильно токовой цепи (исполнительной) при помощи реле и цепи слабого тока.

Если бы дистанционное управление мощным потребителем осуществлялось без применения реле (предыдущая тема), то протяженность и сопротивление проводов исполнительной цепи были бы большими, что при значительной силе тока приводило бы к большой потере энергии. Важно и то, что при использовании реле в цепи управления может быть применено низкое напряжение. Это делает работу оператора безопасной. Электромагнитные реле, рассчитанные на подключение нагрузки мощностью в десятки и сотни киловатт называются магнитными пускателями, которые имеют существенное отличие от реле, но по принципу работы и параметрам процесса, по своей физической сути являющиеся реле.

***Подумайте, как с помощью реле можно решить задачу подвода электроэнергии к удаленной видеокамере и электромотору из прошлой темы?***

Особенностью реле является *скачкообразный характер* их действия. Как только сила тока в цепи управления достигает определенного значения, называемого током срабатывания, сразу происходит скачкообразное изменение силы тока в исполнительной цепи.

Многие автомобили все еще снабжаются обычной батарейной системой зажигания, в которой ток от аккумуляторной батареи (или генератора) идет через первичную обмотку катушки зажигания <https://www.youtube.com/watch?v=DadNzayM6CA> . В установленный момент контакты прерывателя размыкаются и разрывают цепь, что перекрывает магнитный поток и во вторичной обмотке наводится высокая ЭДС индукции. Напряжение от катушки зажигания направляется через провод высокого напряжения к распределителю зажигания, а от него к свечам зажигания <http://avtomotoprof.ru/obslužhivanie-i-uhod-za-avtomobilem/chto-iz-sebya-predstavlyayet-katushka-zazhiganiya-avtomobilya/#i-2>

**Опишите подробно электрические и магнитные процессы, происходящие от момента замыкания контактов до следующего за ним замыкания.**

### Эффект Холла

Американский физик Э. Холл провел эксперимент (1879), в котором пропускал постоянный ток  $I$  через пластинку, изготовленную из золота, и измерял разность потенциалов  $\Delta\phi$  между противоположными точками **A** и **B**

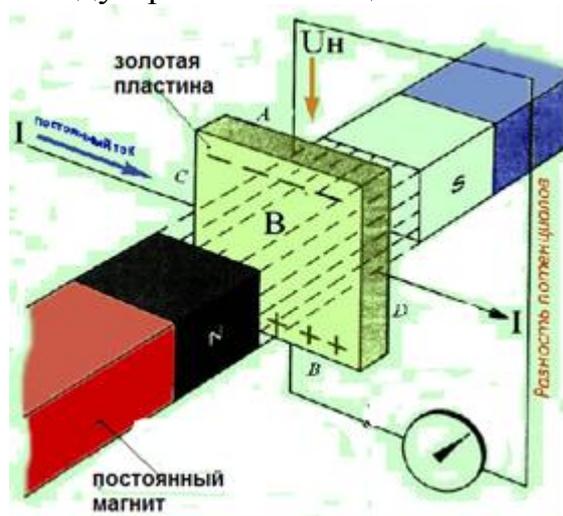


Рисунок 14.5 – Эффект Холла

на верхней и нижней гранях. Эти точки лежат в одном и том же поперечном сечении проводника. Поэтому, как и следовало ожидать, оказалось, что  $\Delta\phi = 0$ . Когда пластинка с током была помещена в однородное магнитное поле, перпендикулярное ее боковым граням, то потенциалы точек **A** и **B** стали разными. Это явление получило название эффекта Холла. Было

установлено, что разность потенциалов  $\Delta\phi$ , между точками **A** и **B** пропорциональна силе тока  $I$ , индукции  $B$  и обратно пропорциональна ширине  $b$  пластинки, т. е.

$$\Delta\varphi = \varphi_A - \varphi_C = RIB/b \quad (14.5)$$

где  $R$  - постоянная Холла,  $b$  – ширина золотой пластинки.

Если магнитное поле не перпендикулярно плоскости пластинки, то величина напряжения между точками А и В будет выражаться формулой

$$U = (RB I \sin\alpha)/ b \quad (14.6)$$

Дальнейшие исследования показали, что эффект Холла наблюдается во всех проводниках и полупроводниках независимо от их материала. Изменение направления тока или вектора  $B$  на противоположное вызывает изменение знака разности потенциалов  $\varphi_A - \varphi_C$ . Числовое значение постоянной Холла  $R$  зависит от материала пластинки  $M$ , причем этот коэффициент для одних веществ положителен, а для других отрицателен.

<https://www.youtube.com/watch?v=R76YMdNY1qI>

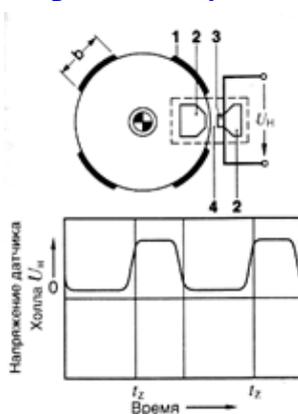


Рисунок. 14.6. –  
Распределитель зажигания  
с датчиком Холла.

Благодаря тому, что выходной эффект определяется произведением двух величин ( $B$  (или  $H$ ) и  $I$ ), датчики Холла имеют весьма широкое применение. В частности датчики Холла применяются для измерения магнитных полей или для управления током, текущем через датчик. Если «включать» или «выключать» магнитное поле, то это приведет к соответствующему изменению тока через датчик, причем произойдет это бесконтактным способом. Поэтому датчики Холла широко используются для прерывания тока. В частности таковым является распределитель зажигания с датчиком Холла. На рисунке 14.6 показан распределитель зажигания бензинового двигателя с датчиком Холла, где: 1 - лопатка шириной  $b$ ; 2 - элементы со слабой магнитной проницаемостью; 3 - датчик Холла; 4 - воздушный зазор;  $U_H$  - напряжение на датчике Холла.

Импульсные генераторы обладают существенным преимуществом над механическими прерывателями, т. к. они не подвержены износу и, таким образом, не требуют обслуживания. Они также обеспечивают точное управление моментом зажигания.

Технология производства и без-опасной эксплуатации большого класса ферромагнитных изделий предусматривает контроль их качества неразрушающими методами. Важное место

среди них занимают магнитные методы контроля, которые обеспечивают высокую надежность и скорость контроля, возможность бесконтактно-го съема информации и являются экологически безопасными для персонала.

На рисунке 14.7 а показано распределение линий магнитного поля в сварном шве не имеющем дефектов. Это поле однородно и находится внутри изделия. При наличии дефекта 2 в сварном шве 1

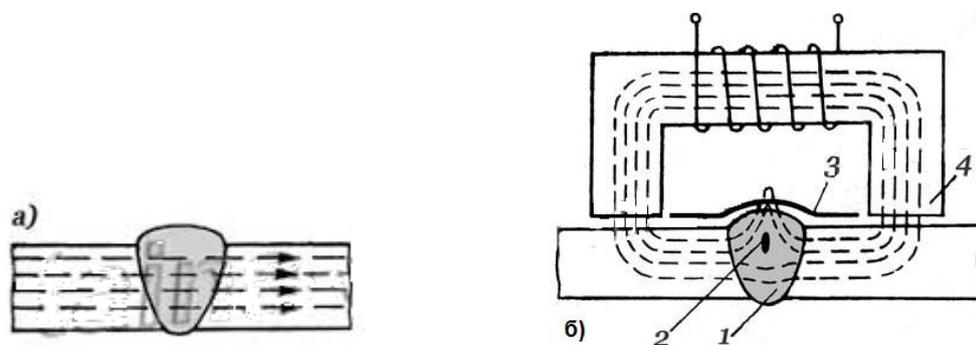


Рисунок.14.7. – Принцип работы магнитного дефектоскопа

на поверхности изделия, покрытого мелкодисперсным магнитным порошком 3 появляется картина измененного магнитного поля, что свидетельствует о наличии брака внутри шва. Сам магнитный дефектоскоп представляет электромагнит 4.

[https://www.youtube.com/watch?v=yZxVRT1fKcI&feature=emb\\_logo](https://www.youtube.com/watch?v=yZxVRT1fKcI&feature=emb_logo)  
<http://strmnt.com/dom/tech/tool/vidy-defektoskopov-primenenie.html>

## Тема 15 Оптика и ее применение в технике и быту.

Как хорошо известно, свет является электромагнитными колебаниями лежащими в диапазоне шкалы электромагнитных колебаний между радиоволнами и  $\gamma$ -излучением. Таким образом оптическим излучением являются электромагнитные колебания в диапазоне от  $10^{-2}$  до  $10^7$  нм (1 см) т.е. инфракрасное (0.1 мм- 770 нм), видимое (770- 380 нм), ультрафиолетовое (380 – 5 нм). рентгеновские лучи  $5 \text{ нм} - 10^{-2} \text{ нм}$ .

Различные части спектра получили различное применение в науке и технике. Важное значение для обеспечения комфортной жизнедеятельности имеют источники теплоты. Основными источниками теплоты являются химические и ядерные реакции, а также различные процессы преобразования энергии. Примерами химических реакций с выделением теплоты являются горение и расщепление компонентов пищи. Почти вся теплота, получаемая Землей, обеспечивается ядерными реакциями, протекающими в недрах Солнца.

Человечество научилось получать теплоту с помощью управляемых процессов деления ядер, а теперь пытается использовать с той же целью реакции термоядерного синтеза. В теплоту можно превращать и другие виды энергии, например механическую работу и электрическую энергию. Важно помнить, что тепловую энергию (как и любую другую) можно лишь преобразовать в другую форму, но нельзя ни получить «из ничего», ни уничтожить. Это один из основных принципов науки, называемой термодинамикой.

Существует три вида теплопередачи:

**Теплопроводность.** Это когда тепло от более нагретого участка тела передается в менее нагретый за счет теплового взаимодействия частиц тела (молекул, атомов). У разных тел она разная. Хорошо проводят тепло металлы. Плохо - дерево, пластики, совсем плохо - пористые вещества пробка, вата, шерсть .

**Конвекция.** Это у жидкостей и газов. Так называется процесс передачи тепла за счет смешивания холодных и более нагретых масс жидкостей и газов за счет теплового смешивания. Мы же знаем, что за счет уменьшения плотности, теплый воздух поднимается вверх, а холодный, более плотный опускается вниз. Вот и происходит смешивание. Это, конечно, не единственный способ конвекции. Но результат один, температура в объеме сравнивается. Пример циркуляция воздуха в квартире, ветер.

Третий вид теплопередачи – лучистый теплообмен – отличается от теплопроводности и конвекции тем, что теплота в этом случае

может передаваться через вакуум. Сходство же его с другими способами передачи тепла в том, что он тоже обусловлен разностью температур. Как уже было сказано тепловое излучение – это один из видов электромагнитного излучения. Другие его виды – радиоволновое, ультрафиолетовое и гамма-излучения – возникают в отсутствие разности температур.

Тепловое излучение может сопровождаться испусканием видимого света, но его энергия мала по сравнению с энергией излучения невидимой части спектра.

<https://www.youtube.com/watch?v=u5D4TxqBDks> и

<https://www.youtube.com/watch?v=b8ThIQBzFFI>

Вспомним, что интенсивность теплопередачи путем теплопроводности и конвекции пропорциональна температуре, а лучистый тепловой поток пропорционален четвертой степени температуры и подчиняется закону Стефана – Больцмана

$$q = \sigma A(T_1^4 - T_2^4), \quad (15.1)$$

где,  $q$  – тепловой поток (в джоулях в секунду, т.е. в Вт),

$A$  – площадь поверхности излучающего тела (в м<sup>2</sup>), а  $T_1$  и  $T_2$  – температуры (в Кельвинах) излучающего тела и окружающего, поглощающего это излучение.

Коэффициент  $\sigma$  называется постоянной Стефана – Больцмана и равен  $(5,66961 \pm 0,00096) \cdot 10^{-8}$  Вт/(К<sup>4</sup>).

<https://www.youtube.com/watch?v=jyqRIAcSToc>

Представленный закон теплового излучения справедлив лишь для идеального излучателя – так называемого абсолютно черного тела. Ни одно реальное тело таковым не является, хотя плоская черная поверхность по своим свойствам приближается к абсолютно черному телу. Светлые же поверхности излучают сравнительно слабо. Чтобы учесть отклонение от идеальности многочисленных «серых» тел, в правую часть выражения, описывающего закон Стефана – Больцмана, вводят коэффициент, меньшей единицы, называемый излучательной способностью. Для плоской черной поверхности этот коэффициент может достигать 0,98, а для полированного металлического зеркала не превышает 0,05. Соответственно лучепоглощательная способность высока для черного тела и низка для зеркального. Понятно, что обогрев жилых и особенно рабочих зон наиболее выгодно производить при помощи ИК- излучения, которое мало поглощается воздухом, а целиком передается людям, станкам и механизмам. Для этого используются инфракрасные излучатели, нагреваемые электрическим током или каталитически окисляющимся природным газом. На рисунке 15.1

показаны два типа обогревателей помещений. Чем больше высота помещений, тем сильнее видна разница эффективности отопления. При конвекционном отоплении теплый воздух находится вверху, в зоне, где обычно нет большого количества людей, а при инфракрасном отоплении тепло равномерно распределено, потому, что ИК лучи не нагревают воздух, а нагревают только оборудование и людей в помещении.

ИК – излучение является очень удобным при сушке краски на автомобилях, т.к. проникает сквозь краску и нагревает металл. Процесс полимеризации идет из глубоких слоёв к наружным и исключает появление пузырей и подтеков.

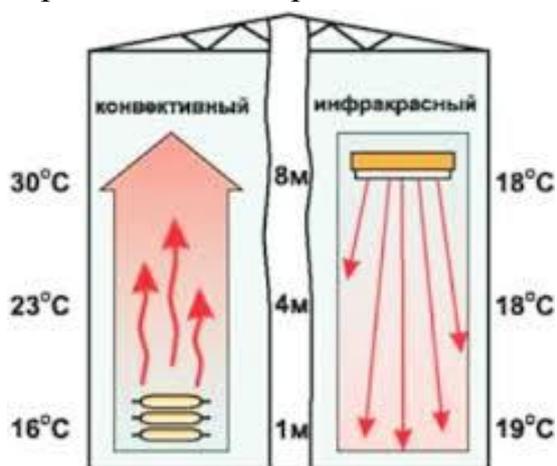


Рисунок 15.1.– Сравнение конвекционного и инфракрасного обогревателей.

<https://www.vseinstrumenti.ru/klimat/obogrevateli/infrakrasnye/articles/ustrojstvo-princip-raboty/>

В приборах ночного видения применяются источник теплового излучения и приемник, чувствительный к ИК-излучению, позволяющий видеть в темноте.

Мощным излучателем тепловой энергии является Солнце; оно нагревает Землю даже на расстоянии 150 млн. км. Интенсивность солнечного

излучения, регистрируемая год за годом станциями, расположенными во многих точках земного шара, составляет примерно 1,37 Вт/м<sup>2</sup>. Солнечная энергия – источник жизни на Земле. Ведутся поиски способов наиболее эффективного ее использования. Созданы солнечные батареи, позволяющие обогревать дома и получать электроэнергию для бытовых нужд.

Известно, что если луч света не очень большой интенсивности падает на зеркальную поверхность, то он от неё отражается в соответствии с законами геометрической или линейной оптики.

***Сформулируйте основные законы линейной оптики.***

Если взять два зеркала и составить их так, чтобы угол между отражающими поверхностями стал равен 90 градусов получим устройство, называемое угловым отражателем, называемым чаще уголковым. *Уголковый отражатель* обладает тем свойством, что под каким бы углом ни падал на него луч света, отраженный луч всегда будет параллелен падающему лучу. Если взять три взаимно ортогональных отражающих плоскости, то мы получим 8 уголковых

отражателей, способных отправить обратно к излучателю сигнал любого направления, пришедший с любой стороны (рисунок.15.2).

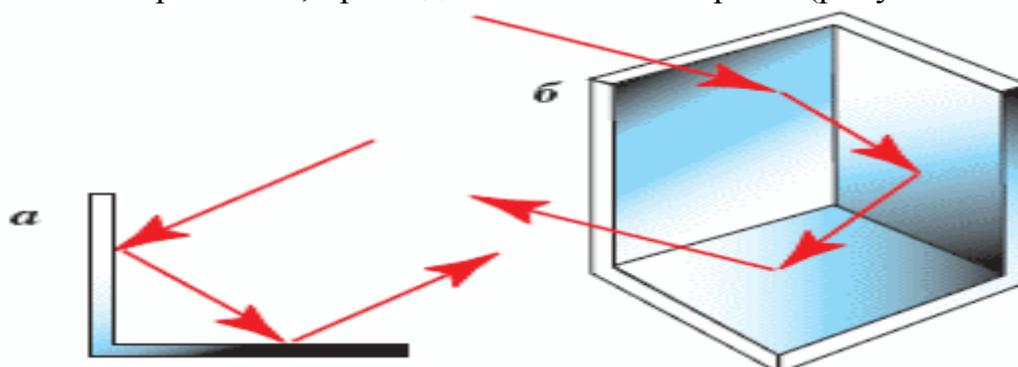


Рисунок 15.2 – Принцип действия уголкового отражателя.

Свойство отраженного луча сохранять направление при повороте углового зеркала вокруг оси находит широкое применение в технике. Так, в трехгранном зеркальном уголкового отражателе луч сохраняет постоянное направление, несмотря на весьма сильные качания зеркала. По форме такое зеркало представляет собой кубик с отрезанным уголком. И в этом случае на практике используют не три зеркала, а соответствующую стеклянную призму с зеркальными гранями. <https://www.youtube.com/watch?v=WB2epFD5r4>

Важной областью применения трехгранного зеркала служит уголкового отражатель (кошачий глаз, катодот, фликер) на велосипедах, мотоциклах, сигнальных предохранительных щитах, ограничителях проезжей части улицы. С какой бы стороны ни упал свет на такой отражатель, световой рефлекс всегда сохраняет направление источника света.

<https://www.youtube.com/watch?v=uIQaDCDYZFk>

Большую роль трехгранные зеркальные уголкового отражатели играют в радиолокационной технике. Самолеты и крупные стальные корабли отражают луч радара. Несмотря на значительное рассеяние его, той небольшой доли отраженных радиоволн, которая возвращается к радару, обычно достаточно для распознавания объекта. Хуже обстоит дело с маленькими суденышками, сигнальными поплавками и пластиковыми парусными яхтами. У небольших предметов отражение слишком слабое. Пластиковые яхты так же «прозрачны» для радиоволн, на которых работает радарная техника, как оконные стекла для солнечного света. Поэтому парусные яхты и сигнальные буйки оснащают металлическими уголкового отражателями. Длина граней у такого «зеркала» всего около 30 см, но этого довольно, чтобы возвращать достаточно мощное эхо.

[http://www.barque.ru/advice/1968/making\\_yacht\\_noticeable\\_-\\_radar\\_reflector](http://www.barque.ru/advice/1968/making_yacht_noticeable_-_radar_reflector)

Идея использовать свет для передачи информации стара как мир. Преимущества этого способа были очевидны даже нашим предкам. Еще в Древней Руси цепь сигнальных костров использовали для того, чтобы предупредить о приближении неприятеля. Но прошло несколько веков, прежде чем были открыты фундаментальные законы оптики. И еще не один век понадобился, чтобы, пользуясь этими законами, создать оптоволоконную технологию.

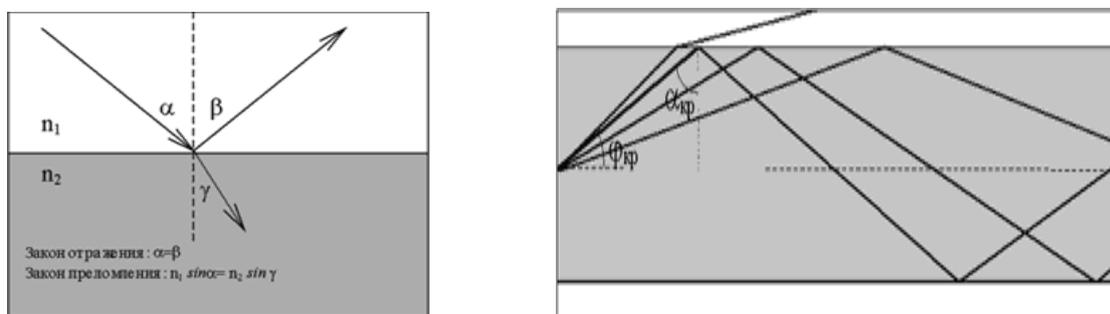


Рисунок.15.2 – Иллюстрация законов отражения и преломления (слева) и принцип действия световода (справа)

Хотя уже во второй половине девятнадцатого века Джон Тиндалл продемонстрировал возможность направленного распространения света по водяной струе, а в двадцатых годах нашего столетия были созданы первые твердотельные световоды, по которым уже передавали изображение, настоящий скачок оптоволоконная технология получила в 50-60-х годах, когда был изобретен лазер, а технологи научились создавать тонкие, прочные и гибкие стеклянные нити.

Коротко- о главных законах оптики, лежащих в основе оптоволоконной технологии. Известно, что в разных средах луч света распространяется с разной скоростью: в стекле - быстро, в воздухе - быстрее, в вакууме - быстрее всего. Попадая на границу двух прозрачных сред, луч света частично отражается, частично преломляется. Угол отраженного луча равен углу падающего, а угол преломленного луча зависит от соотношения показателей преломления сред (отметим, что все углы измеряются от нормали к поверхности). Согласно закону Снеллиуса, открытому еще в 17 веке, произведения синуса угла падающего и преломленного луча на соответствующие показатели преломления сред равны.

Поставим теперь условие, чтобы преломленный луч не проникал во вторую среду, а двигался вдоль границы раздела. Так как при этом  $g=90^0$ , то нетрудно вычислить так называемый *критический угол*:

$$\sin \alpha_{кр} = n_2/n_1 \quad (15.2)$$

Эта формула объясняет "эффект полного отражения", на котором основана вся оптоволоконная технология. Эффект состоит в том, что луч, попавший на границу двух сред (первая из которых должна иметь больший показатель преломления, чем вторая), под углом, большим критического, полностью отражается.

Если же луч не просто попадает на границу двух сред, а проходит в цилиндрическом световоде (оптоволокне) между параллельными стенками, то при угле входа больше критического, он "навсегда" останется в световоде.

<https://www.youtube.com/watch?v=Is5KnRMLdlo>

<https://www.youtube.com/watch?v=QTSCTBM37X0>

Таким образом, чтобы передавать информацию с помощью волоконно-оптической линии связи (ВОЛС), она должна иметь очевидную структуру и состоять из:



Рисунок 15.3. – Принцип действия волоконно-оптической линии связи (ВОЛС)

- передатчика- источника светового сигнала;
- приемника- светочувствительного элемента;
- среды распространения- оптоволокна.

Важными достоинствами оптоволоконных линий связи являются:

- устойчивость к электромагнитным воздействиям;
- отсутствие излучения у оптоволоконного кабеля;
- привлекательные массово-габаритные параметры;
- защищенность от несанкционированного доступа.

Наибольший интерес вызывает главный элемент ВОЛС - оптическое волокно. Его мы рассмотрим наиболее подробно.

Современное оптическое волокно состоит как минимум из двух компонентов: сердцевины (core) и оболочки (cladding). Снаружи волокно покрывается защитным покрытием. В ВОЛС используют оптоволоконные кабели, которые состоят из десятков и сотен волокон.

И сердцевина, и оболочка изготавливаются из стекла или пластика. Наиболее часто (вследствие лучших характеристик) используется оптоволокно типа "стекло-стекло", когда сердцевина и оболочка изготавливаются из особого кварцевого стекла. Понятно,

что стекло, используемое для оболочки, должно иметь меньший показатель преломления, чем для сердцевины.

На практике показатель преломления стекла регулируется с помощью легирующих добавок. В оптических волокнах показатели преломления сердцевины и оболочки различаются на величину порядка 1%.

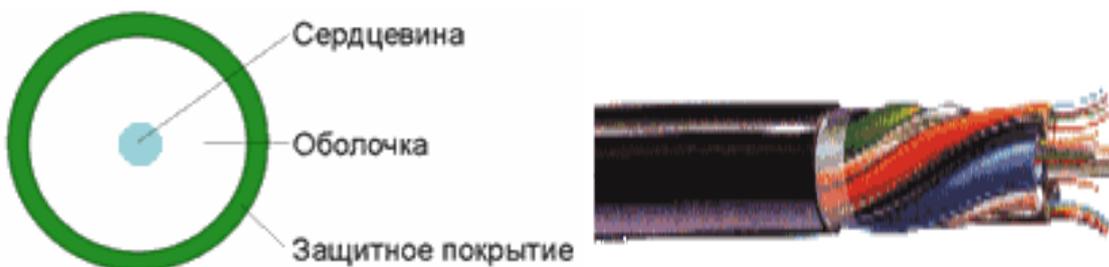


Рисунок.15.4. – Сечение оптического волокна и волоконно-оптический кабель

Полное внутреннее отражение используется для передачи света и изображения по пучкам гибких волокон - световодам. Основным элементом световода - стеклянное волокно цилиндрической формы, покрытое оболочкой из прозрачного материала с меньшим, чем у волокна, показателем преломления. За счет многократного полного отражения свет может быть направлен по любому прямому или изогнутому пути.

Свет, проходящий по оптическим световодам выглядит как миниатюрный фейерверк. Световоды используются при создании телеграфно-телефонных кабелей большой емкости. Кабель состоит из сотен и тысяч оптических волокон, тонких, как человеческий волос. По такому кабелю, толщиной в обычный карандаш можно одновременно передавать до восьмидесяти тысяч телефонных разговоров. Волоконнооптический зонд (эндоскоп) дает врачам возможность исследовать желудочно-кишечный тракт и другие внутренние области организма. Изображения, получаемые зондом, затем передаются на телевизионный экран.  
[https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=5&v=Pfc6Fy4nWS4&feature=emb\\_logo](https://www.youtube.com/watch?time_continue=5&v=Pfc6Fy4nWS4&feature=emb_logo)

Это же свойство волоконно - оптических зондов используется для получения изображений скрытых частей машин и механизмов, что позволяет без разборки произвести диагностику состояния того или иного узла. Способ получения скрытых изображений получил название интроскопии или бороскопии, что означает - видеть скрытое. Такой технический эндоскоп называется волоконно-оптическим интроскопом (бороскопом, эндоскопом). Использование волоконно-оптического интроскопа позволяет получать изображение из таких мест, где невозможно разместить никакую другую

аппаратуру кроме тонкого световода. Поскольку ввод такого световода можно сделать абсолютно герметичным, то становится понятным абсолютное удобство его использования.  
<https://armikus.lv/index.php/ru/mini-kameri/medicinskij-endoskop>

**Дисперсией** света называется зависимость фазовой скорости света в среде от его частоты  $\nu$ . Так как  $v=c/n$ , то дисперсией света можно назвать также зависимость показателя преломления  $n$  среды от частоты  $\nu$  световой волны.

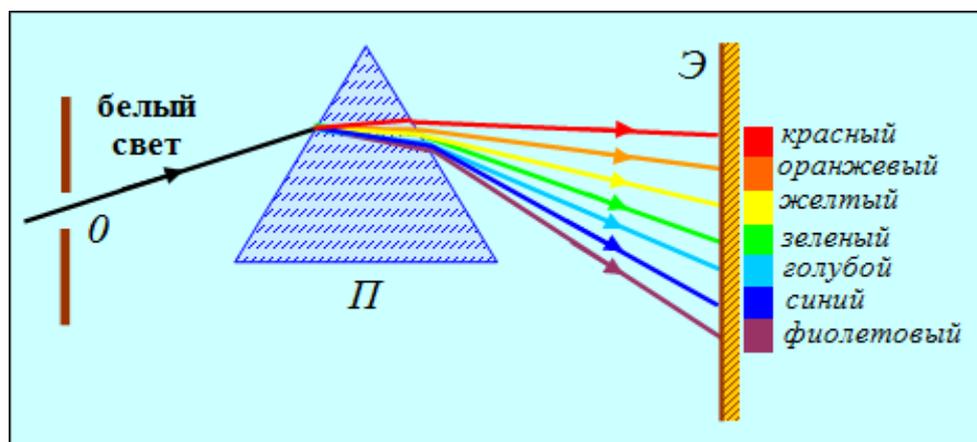


Рисунок.15.5.– Демонстрация дисперсии света на стеклянной призме

Наиболее отчетливо дисперсия света проявляется при прохождении белого света через призму. За призмой лучи белого света окажутся разложенными на составляющие цвета - в спектр. Полученный спектр называют призматическим, в отличие от дифракционного спектра, даваемого дифракционной решеткой.

Итак, дисперсия света – это зависимость показателя преломления вещества от частоты световой волны. Эта зависимость не линейная и не монотонная. Области значения  $\nu$ , в которых с ростом частоты  $\nu$  показатель преломления  $n$  увеличивается соответствуют нормальной дисперсии света. Нормальная дисперсия наблюдается у веществ, прозрачных для света. Например, обычное стекло прозрачно для видимого света, и в этой области частот наблюдается нормальная дисперсия света в стекле. На основе явления нормальной дисперсии основано «разложение» света стеклянной призмой монохроматоров.

Дисперсия называется аномальной, если с уменьшением длины волны  $\lambda$ , или увеличением частоты света  $\nu$  показатель преломления  $n$  уменьшается. Аномальная дисперсия наблюдается в областях частот, соответствующих полосам интенсивного поглощения света в данной среде. Например, у обычного стекла в инфракрасной и ультрафиолетовой частях спектра наблюдается аномальная дисперсия.

На рисунке 15.6 приведен график зависимости  $n$  от  $\lambda$  в веществе, обладающем полосой поглощения света, изображенном штриховой линией. При отсутствии поглощения света 1-2 и 3-4 наблюдается нормальная дисперсия- с увеличением  $\lambda$  показатель преломления уменьшается.

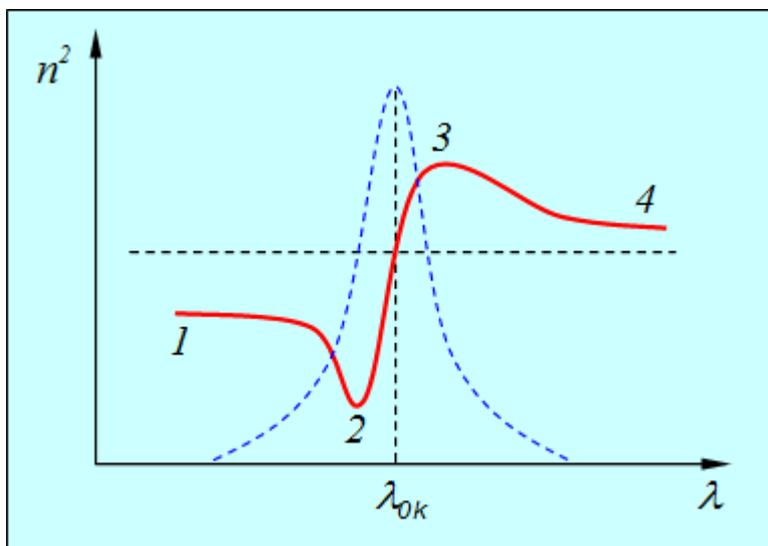


Рисунок 15.6. – Нормальная и аномальная дисперсия света в поглощающей среде

Область 2-3, для которой с увеличением длины волны  $\lambda$  показатель преломления увеличивается называется областью аномальной дисперсии, т.е. для нее

$$\frac{dn}{d\lambda} < 0 \quad \text{или}$$

$$\frac{dn}{d\lambda} > 0$$

В области аномальной

дисперсии поглощение света очень велико.

Это важное свойство поглощения света прозрачными средами очень широко используется в практике физического анализа состава веществ. Используемые для этого приборы исследуют интенсивность света, прошедшего через среду поглощающую свет на резонансных для составляющих этой среды молекул частотах. Такие приборы называются спектральными.

В практике настройки и технического обслуживания двигателей внутреннего сгорания необходимо, чтобы отработавшие газы двигателей соответствовали экологическим нормам. Кроме этого состав выхлопных газов напрямую определяет топливную экономичность двигателя. ГОСТом нормируется содержание в выхлопных газах двигателей Отто содержание оксида азота (СО), углеводородов(СН), а для двигателей Дизеля - сажи (дымность или непрозрачность выхлопных газов).

Специфика физико-химических измерений вообще и газоаналитических измерений в частности отличается огромным многообразием задач, в решении которых используются самые разнообразные свойства индивидуальных веществ. Приходится работать с большим числом определяемых компонентов и в очень

широком диапазоне измеряемых концентраций. Все это делает непростой задачу краткого и вместе с тем достаточно полного изложения сущности методов и подходов в решении задач газоаналитики.

Одним из физических принципов, на котором основаны многие методы газового анализа, является закон поглощения электромагнитного излучения Ламберта – Бугера - Бера. Согласно этому закону через слой поглощающего или рассеивающего вещества проходит электромагнитное излучение интенсивностью  $I_\lambda$ , равное:

$$I_\lambda = I_0 e^{-\delta_\lambda N l}, \quad (15.3)$$

где  $I_\lambda$  - интенсивность излучения, падающего на поглощающий столб;  $N$  - концентрация поглощающих атомов (число молекул в единице объема);  $l$  - длина поглощающего столба,  $\delta_\lambda$ - молекулярная

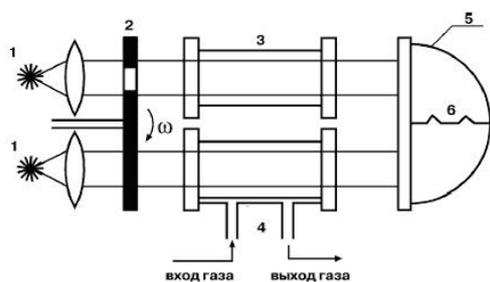


Рисунок. 15. 7. Схема опто-акустического газоанализатора (слева) и внешний вид многокомпонентного газоанализатора (справа): 1 – источники ИК излучения; 2 – модулятор; 3 – кювета сравнения; 4 – кювета для напуска пробы; 5 – опто-акустический приемник (ОАП); 6 – микрофон

константа, равная площади «тени», создаваемой одним атомом и выраженной в соответствующих единицах. В самом деле, методы, основанные на поглощении света, электромагнитных волн в ИК или в радиочастотном диапазоне, достаточно универсальны в том смысле, что любое вещество в том или ином диапазоне длин волн поглощает излучение. В анализе состава газовых смесей можно выделить два больших класса аналитических приборов: недисперсионные, в которых не осуществляется разложение излучения по длинам волн, и спектральные, в которых тем или иным способом электромагнитное излучение разделяется по длинам волн. Еще одним классом газоаналитических приборов являются устройства, в которых наличие какого-либо компонента в смеси фиксируется по электрохимическому или термохимическому эффекту. Суть двух

последних методов состоит в том, что для некоторых газов существует возможность подбора химического состава датчиков таким образом, чтобы при соприкосновении материалов датчика с анализируемыми компонентами газовой смеси либо появлялся бы потенциал на поверхности соприкосновения (электрохимический эффект), либо изменялась бы температура (термохимический эффект). Для контроля состава отработавших газов автотранспорта в процессе эксплуатации разработан оптико-акустический газоанализатор. Ультрамикрoконцентрации оксида углерода, содержащегося в атмосферном воздухе, также измеряют *спектроабсорбционным методом* с использованием полосы поглощения CO в инфракрасной области спектра 4,66 мкм, где приемниками лучистой энергии служат герметичные камеры с конденсаторным микрофоном, заполненные газовой смесью из определяемого газа.

Такие газоанализаторы называют оптико-акустическими. Действие оптико-акустических газоанализаторов основано на способности определяемого газа поглощать инфракрасные лучи. Этой способностью обладают все газы, за исключением одноатомных, а также водорода, кислорода, азота и хлора. Каждый газ поглощает инфракрасные излучения только в своих, свойственных ему участках спектра. Измерение содержания газа производят на основании оптико – акустического эффекта, который заключается в том, что газ, способный поглощать инфракрасные лучи, при прерывистом облучении в замкнутом объеме (луче приемника) периодически нагревается и охлаждается, в результате чего происходят колебания давления газовой смеси. Колебания давления воспринимаются чувствительным элементом – мембраной, которая является одной из обкладок конденсаторного микрофона. В качестве источника инфракрасного излучения используются хромоникелевая проволока, нагретая до 700-800 °С. Инфракрасные излучения анализируемую смесь пропускают через окна, изготовительные из синтетического корунда или других материалов, пропускающих это излучение. Прерывание потока излучения производится с частотой 5 – 6 Гц. Изменение емкости конденсатора при действии на луче приемник полного потока инфракрасного излучения в среднем составляет 0.3пФ при смещении мембраны на 1 мкм.  
<https://www.youtube.com/watch?v=97sSOv1Mr84>

В двухканальной дифференциальной схеме (рисунок 15.7) потоки излучения поступают в два оптических канала - в рабочую кювету с анализируемой газовой смесью и сравнительную камеру, заполненную газовой смесью постоянного состава. Фильтровые камеры заполняются не измеряемыми газами, которые поглощают

излучение спектра частот мешающих газов, полоса частот определяемых газов проходит свободно. Прерывистые потоки излучения, сдвинутые по фазе на половину периода оборота обтюлятора, суммируются, и создают в пространстве над мембраной колебания давления. При равенстве потоков колебания давления не происходит.

Основным преимуществом оптико-акустического метода газового анализа является его высокая чувствительность. Физическая сущность этого состоит в том, что закон Ламберта-Бугера-Бера для поглощения электромагнитного излучения в этом случае работает для всего спектра поглощения. Аналитический сигнал формируется по интегральному поглощению излучения на всех частотах, присутствующих в диапазоне излучения источника света. Суммируются как вращательно-колебательные, так и электронные переходы в молекулах.

У оптических датчиков имеется и один общий недостаток - влияние на показание мешающих компонентов. В инфракрасной области это различные молекулярные газы, например двуокиси углерода, серы, азота, углеводороды и т. д. По этой причине измеряемую пробу газа тщательно очищают от паров воды, заставляя её конденсироваться, и от частичек сажи. Тем не менее можно выбрать длины волн, где поглощение минимально, а поглощение измеряемого компонента газовой смеси максимально.

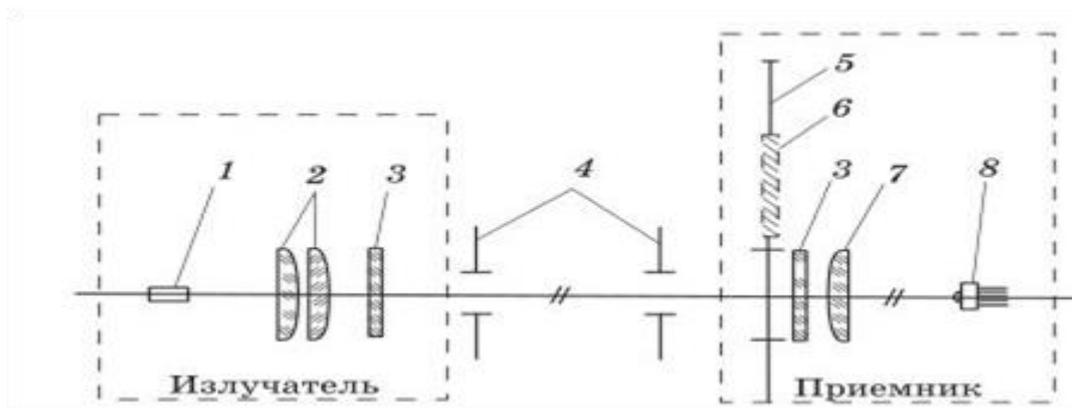


Рисунок 15.8 – Принципиальная схема оптического детектора дымомера ДО-1: 1 — источник света; 2 — конденсатор; 3 — защитные стекла; 4 — диафрагма; 5 — заслонка; 6 — светофильтр; 7 — линза; 8 — фотоприемник

Особое место в анализе отработавших газов (ОГ) любых источников энергии (двигателей внутреннего сгорания, катален или тепловых пунктов) занимает количественная оценка дымности (под которой понимают их оптическую плотность) и содержания сажи, непосредственно связанных друг с другом. Качественный и количественный составы дисперсной фазы аэрозоля выпуска

определяют при анализе набивки абсолютного фильтра, сквозь который пропускают газ в течение фиксируемого промежутка времени.

С помощью такого фильтра можно получить наиболее, достоверные данные, однако создание его представляет большие технические трудности. Поэтому о содержании дисперсной фазы обычно судят либо по косвенным показателям (цвету, оптической плотности и т. д.), либо по концентрациям в газах сажи, измерение которых, в свою очередь, ведется косвенными методами. В настоящее время распространены два метода: просвечивания ОГ и их фильтрация. Приборы, которые предназначены для работы по первому методу, называют дымомерами, по второму - сажемерами. Первый метод основан на просвечивании столба выпускных газов известных размеров с замером на фотоэлементе степени поглощения света (рисунок 15.8).

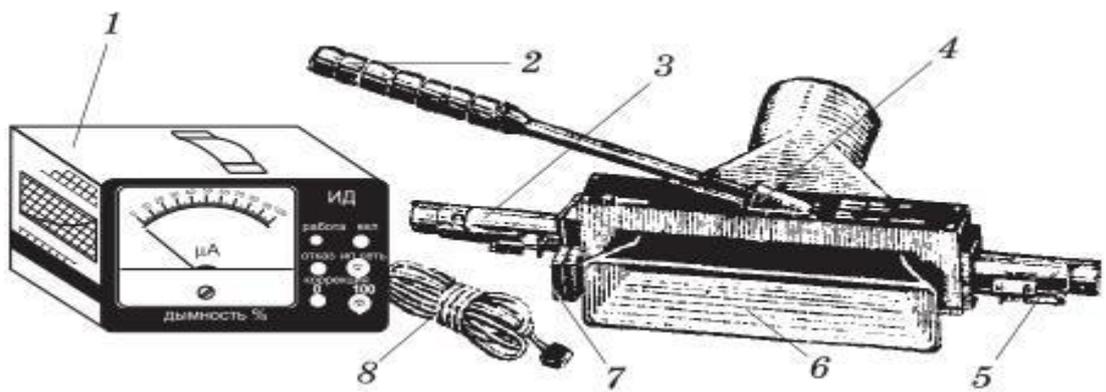


Рисунок 15.9. – Внешний вид оптического дымомера ДО-1.

Дымность измеряется сравнительным методом по эталонному уровню дымности, который определяется коэффициентом пропускания светофильтра. В качестве источника света используется единичный индикатор с длиной волны  $(675 + 5)$  нм.

Принцип метода фильтрации заключается в пропускании через набивку фильтра (фильтровальная бумага, ультратонкие волокна ацетилцеллюлозы, фильтр Петрянова и т. д.) определенного объема газа с последующей оценкой степени почернения фильтра сравнением с тоновыми шкалами или фотометрически (рисунок 15.10). Разновидностью метода фильтрации является метод взвешивания набивки фильтра до и после пропускания через него газа. Фильтрационный метод основан на измерении степени почернения фильтра, через который прокачивают строго определенное количество (от 0,3 до 1 л) отработавших газов или запыленного воздуха. В последнем случае прибор будет называться пылемером. Степень почернения фильтра оценивается оптическим

методом по величине интенсивности отраженного света, направленного на поверхность фильтра.

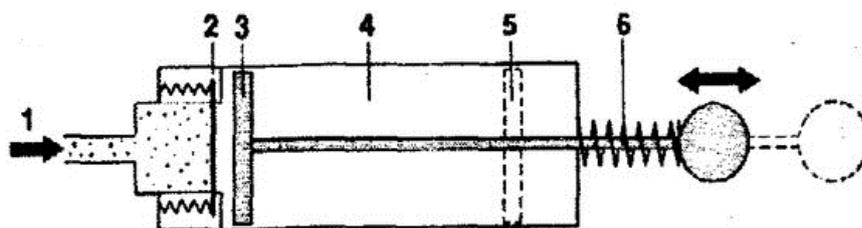


Рисунок.15.10. – Насос для забора пробы. 1- проба газа, 2 фильтр, 3 и 5 – начальное и конечное положение поршня, 4- камера, 6- пружина

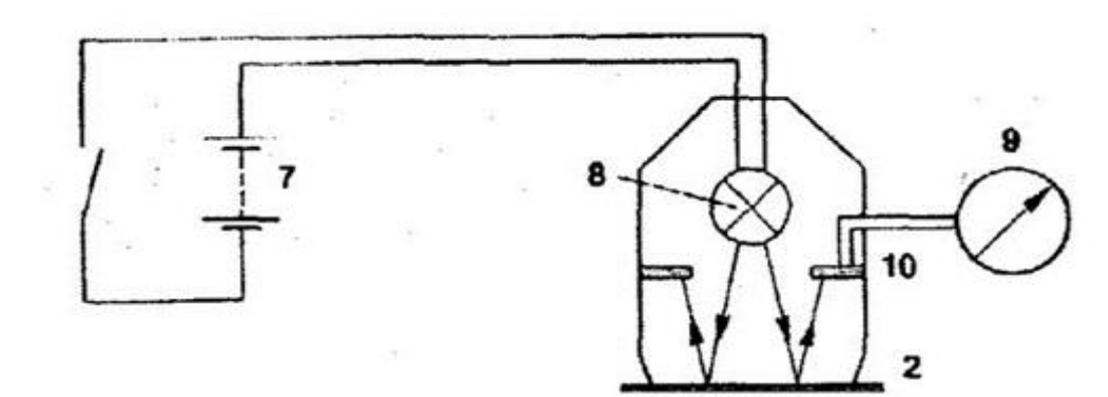


Рисунок15.11.– Принцип измерения содержания сажи или пыли в пробе воздуха

7- источник тока, 8 – источник света, 9- миллиамперметр. 10 - фотодатчик

Для целей дистанционного зондирования атмосферы используют лазерные газоанализаторы и уголковые отражатели.

Например: лазерный газоанализатор типа ЛГА предназначен для измерения концентрации метана в атмосферном воздухе. Входит в состав передвижных лабораторий для оперативного обследования трасс магистральных и городских газопроводов с целью обнаружения утечки газа. Принцип действия газоанализатора основан на лазерном прямом абсорбционном методе измерения, который заключается в резонансном поглощении излучении метана на длине волны 3,39 мкм.

**Тема 16 Применение радиоактивных веществ в технике.  
Использование радиоизотопов для определения уровня жидкости.  
Самосветящиеся краски и материалы. Использование  
радиоактивных изотопов для контроля износа и в качестве  
сигнализаторов износа. Гамма дефектоскопия.**

Уже много десятилетий радиация успешно применяется в промышленной сфере. Использование ядерной энергии позволяет решать многие очень важные задачи этой отрасли, в частности, проблему утилизации продуктов нефтепереработки, переработки тяжелых углеводородов и других веществ со сложным молекулярным строением, контроля утечек вредных веществ и многие другие задачи. Кроме того, радиоактивные изотопы в промышленности используются для:

- получения новых полимеров;
- производства строительных материалов;
- выявления скрытых дефектов в инженерных коммуникациях;
- определения толщины пластика, бумаги и других материалов;
- исследования смазочных материалов;
- решения различных строительных и горнодобывающих задач посредством контролируемых ядерных взрывов.

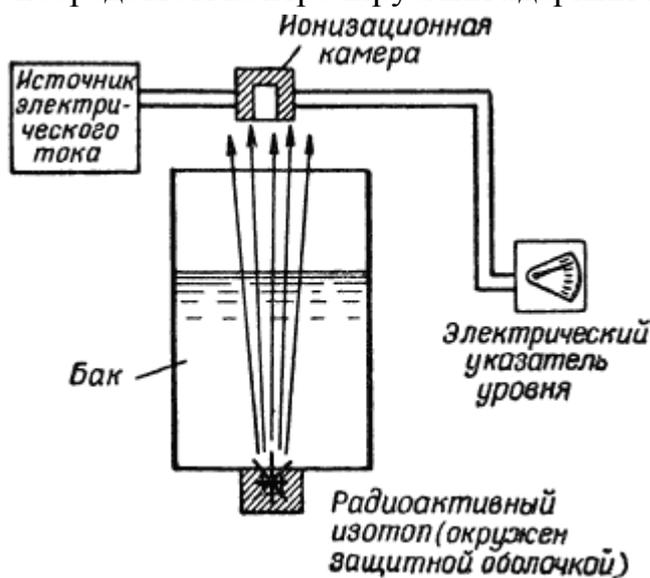


Рисунок 16.1 – радиоактивный измеритель объема или массы

Среди главных преимуществ радиационного метода можно назвать высокую скорость выполнения той или иной задачи, возможность полной или частичной автоматизации промышленных процессов, низкие затраты (по сравнению с другими источниками энергии) на интеграцию установок радиационной обработки в уже установленные технологические линии.

В ряде случаев в производстве необходимо производить дистанционное измерение уровня расплавленного металла, ядовитых и химически активных или криогенных жидкостей. Наибольшее распространение получили методы измерения при помощи искусственных радиоактивных изотопов. В основе метода лежит принцип поглощения

радиоактивного излучения соответствующим материалом, содержащимся в резервуаре. Пучок лучей, излучаемый радиоактивным источником, проникает через резервуар по прямой линии. На стенке резервуара, лежащей против излучателя, расположен приемник, преобразующий принятые лучи в электрические импульсы. Вследствие поглощения радиоактивных лучей материалом внутри резервуара интенсивность принятого излучения зависит от высоты уровня.

Возникающие на выходе приемника импульсы, частота которых пропорциональна интенсивности излучения, подводятся к переключающему устройству, реле которого срабатывает, как только число импульсов в единицу времени достигнет заранее заданной

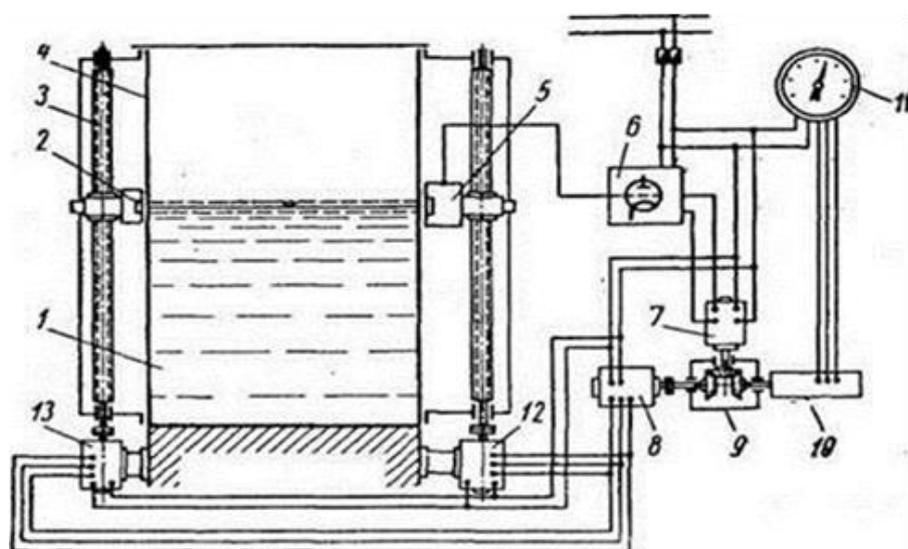


Рисунок 16.2 – Следящий радиоизотопный уровнемер

1 - измеряемая сыпучая или жидкая среда; 2 - излучающее устройство; 3 - подъемный механизм (червяк, лента или рейка с зубцами); 4 - стенка резервуара; 5 - счетчик Гейгера; 6 - электронный блок поддержания равновесия в системе; 7 - электродвигатель; 8 - сельсин-датчик; 9 - механический редуктор; 10 - индукционный датчик; 11 - показывающий (регистрирующий) прибор; 12 и 13 - сельсин-приемники

величины, определенной при градуировке. Понятно, что для более толстых стенок сосуда необходимо использование радиоактивного препарата более высокой энергии. Для того чтобы практически иметь дело по возможности со слабыми препаратами и, следовательно, с минимальной радиационной защитой, расстояние между излучателем и приемником должно быть минимальным. В доменных печах вагранках, шахтных известковообжигательных печах, например, этого можно достичь благодаря уменьшению толщины стенки в местах установки излучателя и приемника путем применения трубок,

заделанных с переднего конца. Ослабление мощности излучения радиоактивного излучателя вследствие поглощения воздухом происходит по квадратичному закону. Степень поглощения радиоактивного излучения твердыми и жидкими материалами зависит в первую очередь от их плотности. Укажем заранее, что именно такой же способ используется при проведении гамма дефектоскопии, - определении скрытых раковин, неплотностей, трещин уже в готовых изделиях.

Рассмотрим устройство (рисунок 16.3) определения уровня разлитой стали в изложницах, специальном кристаллизаторе, где происходит остывание стали и превращение его в заготовку. Радиоактивное измерительное устройство состоит из стержневидного препарата кобальта 60, сцинтилляционного счетчика и специального усилителя.

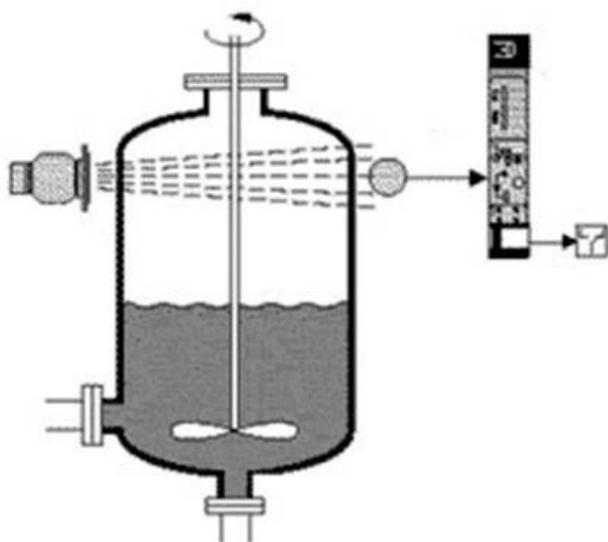


Рисунок 16.3 – Радиоизотопный сигнализатор уровня

Источники радиоактивного излучения и счетчики размещают на кристаллизаторе таким образом, чтобы через участок, на котором в процессе разлива стали должен установиться ее уровень, могли проходить и улавливаться счетчиком радиоактивные изотопы, поступающие от источника их излучения. Толщина и плотность просвечиваемого материала определяют степень поглощения радиоактивного излучения и,

следовательно, число изотопов, улавливаемых счетчиком. При повышении или понижении уровня стали на участке измерения его высоты в кристаллизаторе происходит большее или меньшее перекрытие радиоактивного излучения и вместе с тем изменение числа гамма-квантов, улавливаемых счетчиком. Следовательно, количество попадающих на счетчик гамма-квантов служит мерой высоты

уровня жидкой стали в кристаллизаторе. При обнаружении и проверке дефектов в готовых изделиях при гамма дефектоскопии изменение количества гамма квантов является сигналом наличия в изделии какого – либо дефекта, - трещины, уплотнения, раковины и т.п.

Гамма-кванты, достигающие счетчика, вызывают световые вспышки во вмонтированном кристалле йодистого натрия, частота которых пропорциональна интенсивности проходящего радиоактивного излучения. Вместе с кристаллом находится оптически подрегулированный фотоэлектронный умножитель, в светочувствительной части которого световые вспышки вызывают образование вторичных электронов. Затем в результате работы специальных умножителей, усилителей и преобразователей полного сопротивления получают соответствующие импульсы.

[https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=4&v=XIIViaNITIW&feature=emb\\_logo](https://www.youtube.com/watch?time_continue=4&v=XIIViaNITIW&feature=emb_logo)

Свойство гамма-лучей проникать в толщу различных веществ используется при определении скрытых дефектов в металлах, строительных материалах, пластмассах и керамике. На этом основано несколько способов гамма-дефектоскопии.

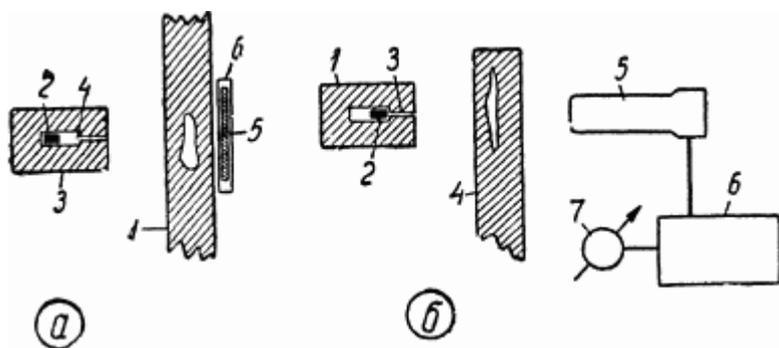


Рисунок 16.4 – а - фотографический метод дефектоскопии; б - фотолуминесцентный метод дефектоскопии

Фотографический метод (рисунок. 16.4, а). С одной стороны контролируемой детали 1 располагается источник радиоактивного излучения 2, помещённый в защитный свинцовый кожух 3 с

открывающимся отверстием 4, а с противоположной стороны детали помещается фотографическая пластинка 5 в кассете 6. Гамма-лучи, проходя сквозь толщу детали, частично поглощаются. Если гамма-лучи встречают на своем пути пустоту (раковину, трещину, отверстие) или инородное тело, степень поглощения изменяется. Все эти неравномерности фиксируются на фотопластинке и показывают очертание неоднородностей в «просвечиваемом» образце. Данный метод используется в случаях, когда необходимо видеть точную топографию дефекта. В этом случае требуется значительная концентрация излучения, которая влечёт за собой усложнение защитных приспособлений и увеличение размеров установки. Ионизационный метод аналогичен первому, только вместо фотопластинки с противоположной стороны исследуемого образца помещаются ионизационная камера или счетчик частиц (счётчик

Гайгера - Мюллера), электрически связанные с усилительным или пересчётным устройством и механическим счётчиком-нумератором или стрелочным прибором. Частицы, прошедшие через «просвечиваемую» деталь, улавливаются счётчиком (камерой) и после усилителя импульсов фиксируются нумератором. Увеличение или уменьшение числа импульсов будет сигнализировать о наличии неоднородности в детали.

В противоположность фотометоду в данном случае деталь может быть подвижной, но осуществить непрерывный контроль путем счёта импульсов трудно, так как требуется периодическая фиксация числа прошедших импульсов.

Фотолюминесцентный метод (рисунок. 16.4, б) аналогичен предыдущим в смысле методики просвечивания. Разница заключается лишь в том, что вместо фотопластинки или счётчика частиц помещается так называемый сцинтилляционный (сцинтилляция - искрение, сверкание кристаллов в виде вспышек под действием радиоактивного излучения) счётчик. Частица, прошедшая через толщу образца 4, попадает на кристалл и вызывает его свечение - вспышку, воспринимаемую расположенным за кристаллом фотоумножителем 5. Изменение фототока в зависимости от свечения кристалла усиливается усилителем 6 и фиксируется гальванометром 7. Свечение кристаллов (нафталина, шеелита, сернистого цинка, йодистого натрия и некоторых других) под действием гамма-излучения будет пропорционально интенсивности попадающего на них пучка гамма-фотонов. В силу того, что кристалл светится чрезвычайно слабо, для регистрации свечения применяют фотоумножитель - в данной конструкции ФЭУ-19, с последующим усилением по постоянному току.

<https://svarkalegko.com/tehonology/radiographicheskiy-metod-kontrolya.html>

В ряде случаев необходимо иметь источники света не зависящие от других источников энергии, а энергия должна заключаться в самих источниках. Такие источники света и соответственно краски называются самосветящимися. Например, в цехах опасных производств, подземных рудниках, подводных лодках такими красками обозначают направления к аварийному выходу, аварийные люки и различные органы управления, необходимые при образовании чрезвычайной ситуации.

[https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=19&v=qiS731IHtOY&feature=emb\\_logo](https://www.youtube.com/watch?time_continue=19&v=qiS731IHtOY&feature=emb_logo)

Для светящихся красок и в качестве слабых источников света применяются т. н. светосоставы постоянного действия (СПД) люминофоры с примесью небольшого количества радиоактивного

вещества. Первоначально к люминофорам добавлялись естественные  $\alpha$ -радиоактивные вещества (Ra или Th). Срок работы таких СПД ограничивается радиационным повреждением люминофоров. Этим недостатком не обладают СПД с  $\beta$ -излучателями, в качестве которых применяются некоторые изотопы с малой энергией  $\beta$ -частиц. Разрабатывается применение газообразного  $Kg85$  в баллонах, покрытых люминофором изнутри



Рисунок 16.5. – Циферблат часов с самосветящейся краской

Люминофоры для регистрации ядерных излучений в сцинтилляционных счетчиках, применяемые в виде больших неорганических или органических монокристаллов, а также пластмасс и жидких растворов, называются сцинтилляторами.

В приборостроении и в часовой промышленности часто применяются люминофоры (рисунок 16.5). Светящиеся радиолуминесцентные циферблаты приборов и часов имеют известные достоинства, но для их изготовления применяются радиоактивные материалы.

<https://mydiscoveries.ru/kakie-veshhestva-svetyatsya-v-temnote>

В детекторах дыма системы сигнализации используются альфа-излучатели.

Мощное гамма-излучение радиоактивных препаратов используют для исследования внутренней структуры металлических отливок с целью обнаружения в них дефектов.

Все более широкое применение получают радиоактивные изотопы в сельском хозяйстве. Облучение семян растений (хлопчатника, капусты, редиса и др.) небольшими дозами гамма-лучей от радиоактивных препаратов приводит к заметному увеличению урожайности. Большие дозы радиации вызывают мутации у растений и микроорганизмов, что в отдельных случаях приводит к появлению мутантов с новыми ценными свойствами (радиоселекция). Так выведены ценные сорта пшеницы, фасоли и других культур, а также получены высоко продуктивные микроорганизмы, применяемые в производстве антибиотиков. Гамма-излучение радиоактивных изотопов используется также для борьбы с вредными насекомыми и для консервации пищевых продуктов. Широкое применение получили «меченые атомы» в агротехнике. Например, чтобы выяснить, какое из фосфорных удобрений лучше усваивается растением, помечают различные удобрения радиоактивным фосфором  $^{32}P$ . Исследуя затем растения на радиоактивность, можно определить количество усвоенного ими фосфора из разных сортов удобрения.

Интересным применением радиоактивности является метод датирования археологических и геологических находок по концентрации радиоактивных изотопов. Наиболее часто используется радиоуглеродный метод датирования. Нестабильный изотоп углерода возникает в атмосфере вследствие ядерных реакций, вызываемых космическими лучами. Небольшой процент этого изотопа содержится в воздухе наряду с обычным стабильным изотопом. Растения и другие организмы потребляют углерод из воздуха, и в них накапливаются оба изотопа в той же пропорции, как и в воздухе. После гибели растений они перестают потреблять углерод и нестабильный изотоп в результате  $\beta$ -распада постепенно превращается в азот с периодом полураспада 5730 лет. Путем точного измерения относительной концентрации радиоактивного углерода в останках древних организмов можно определить время их гибели.

При испытаниях новой техники необходимо знать скорость и степень износа трущихся пар. Это позволяет давать рекомендации эксплуатационникам по техническому обслуживанию, интервалу замены масла, остановки машины на капитальный или профилактический ремонт. Широкое распространение в мировой практике машиностроения и эксплуатации нашел метод радиоактивных изотопов. Суть метода основана на изменении величины радиоактивного излучения смазочного масла, смазывающего трущиеся поверхности. Радиоактивность материала деталей создается введением радиоактивных изотопов в металл при плавке или с помощью покрытия деталей слоем из радиоактивных веществ. Радиометрический метод связан с измерением радиоактивности продуктов изнашивания, содержащихся в смазочном масле, накапливающихся в масляном фильтре.

Способ основан на взятии пробы отработавшего масла, где накопились продукты изнашивания, представляющие собой металлические частицы, окислы металлов и продукты химического взаимодействия металлов с активными компонентами смазочных материалов. Этот способ позволяет избежать необходимости разборки машин и их узлов. Он применяется в лабораторных и эксплуатационных условиях для измерения интегрального износа узлов различных машин, например технологического оборудования, транспортных машин, двигателей внутреннего сгорания, зубчатых передач и т. п. Точность метода определяется чувствительностью приборов к содержанию в масле металлических примесей ( $10^{-6}$ ...  $10^{-8}$  г в  $1 \text{ см}^3$  масла). Необходимо, чтобы проба характеризовала среднее содержание продуктов изнашивания в масле. Для этого, например, при взятии пробы из картера двигателя масло сливают и тщательно перемешивают.

В ответственных деталях механизмов, предельный износ которых может привести к катастрофе, например в авиации, применяют сигнализаторы предельного износа. Для этого в тело деталей на глубину предельного износа устанавливают радиоактивный элемент, а затем его покрывают нерадиоактивным припоем или клеем. Чаще всего для этих целей в деталях делают сверление диаметром 0,5-1 мм, куда и помещают радиоактивные вставки.

При определенном износе происходит вскрытия радиоактивных вставок тех или иных изотопов и радиоактивное вещество попадает в смазочное масло, сигнализируя о наступившем износе. *Изобразите этот способ на рисунке.*

Активационный анализ имеет общие черты со спектральным и радиометрическим методами. Содержание продуктов изнашивания в масле определяется по их радиоактивности посредством анализа спектров гамма-излучения пробы после облучения ее нейтронами.

Существует еще способ поверхностной активации. Основой способа является измерение снижения радиоактивности при изнашивании поверхности детали, в которой на заданном участке создан радиоактивный слой глубиной 0,05...0,4 мм путем облучения участка поверхности или вставки в нее заряженными частицами (нейтронами, протонами, альфа-частицами). Износ детали определяется по тарировочному графику путем сопоставления снижения ее радиоактивности со снижением радиоактивности образцов, активированных в одинаковых условиях с деталью. Тарировочный график строится при моделировании процесса изнашивания на образцах. При этом измеряют радиоактивность образца, с которого последовательно удаляют (сошлифовывают) слои материала.

Определение радиоактивности деталей основано на измерении гамма-излучения различными методами.

Автоматический контроль за состоянием основных узлов и процессов в станке при металлообработке

Методы измерения износа режущего инструмента

а) прямые методы измерения. Эти методы предусматривают непосредственное измерение параметров износа, при этом контролируется износ (по лунке, образующейся на передней поверхности), расстояние от режущей кромки до центра лунки, глубина лунки, ширина ленточки износа по задней поверхности, уменьшение объема или массы инструмента, размерный износ режущей кромки, разброс размеров деталей в партии и т.д.. Указанные параметры могут быть определены радиоактивными, оптико-

телевизионными, лазерными, электромеханическими, ультразвуковыми или пневматическими методами.

<http://school4mama.ru/qa/2011663952-metody-opredeleniya-velichiny-iznosa-detaley-mashin.html>

Радиоактивный метод основан на применении радиоактивных датчиков. Режущая пластина облучается нейтронами, и в процессе резания небольшие радиоактивные частицы инструмента отходят вместе со стружкой. Стружка проходит через измерительную головку, где измеряется уровень радиоактивности. Уровень радиоактивности стружки зависит от объема унесенного инструментального материала и, следовательно, от полного износа инструмента. Радиоактивные частицы предлагается размещать по границам зоны износа. Падение радиоактивности означает, что зона износа распространилась дальше мест расположения радиоактивных частиц.

Недостатками данных способов являются низкая точность, сложная измерительная аппаратура, невозможность работы с переточенными режущими инструментами, необходимость работы с радиоактивными веществами. Поэтому несмотря на относительную простоту реализации данного способа, он практически не получил распространения.

Стерильность — главный критерий качества многих медицинских препаратов. При радиостерилизации предметы, герметически упакованные в картонных коробках, несколько раз проходят по конвейерной системе перед источником Со-60.

Радиация, испускаемая Со-60, проникает через упаковочный материал, убивая микробные патогены в продуктах, и тем самым делает их стерильными. По сравнению с обычными методами, радиостерилизация имеет следующие преимущества:

непрерывная работа радиационной установки с минимальным техническим обслуживанием и уходом;

высокая эксплуатационная надежность; гарантия высокого качества стерильности; отсутствие использования токсичных химикатов; возможность обработки многих пластмассовых предметов разового использования.

<https://ru.coursera.org/lecture/elementy-atomnoj-i-yadernoj-fiziki/ispolzovaniie-radioaktivnykh-istochnikov-i-prieparatov-v-promyshliennosti-i-ALhOp>

<https://www.net-film.ru/film-55401/>

## Список использованных источников

1. Большая Советская Энциклопедия [Текст]: в 30 т./гл. ред. А.М. Прохоров. – М.: Советская энциклопедия, 1974.
2. Балдаев Радж, В. Раджендран, П. Паланичами, Мир физики и техники. – М.: Техносфера, 2006. – 579 с.
3. Энциклопедия «Физика» и «Техника», – М.: Аванта+, 2001.
4. Накопители энергии: Учеб. Пособие для вузов/ Д.А.Бут, Б.Л.Алиевский, С.Р.Мизюрин, П.В.Васюкевич: – М. Энергоатомиздат, 1991ю 400 с.: илл. ISBN 5-283-00609-3/
5. Нурбей Гулиа: Удивительная механика. В поисках "энергетической капсулы" ЭНАС-КНИГА, – 2013 г. 176 с. ISBN: 5-93196-591-2
6. Енохович, А. С. Справочник по физике и технике [Текст], учеб. пособие для учащихся. — 3-е изд., перераб. и доп.— М.: Просвещение, 1989.
7. Пэт, Уэйр. Военная техника. [Текст], Большая иллюстрированная энциклопедия. – М.: Клуб семейного досуга, 2012.
8. Энциклопедия для детей. Физика [Текст]: в 2 частях.– М.: Аванта+, 2000.
9. Глазунов А.Т. Техника в курсе физики средней школы. - М.: Просвещение, 1977. - 159 с.
10. Куприн М.Я. Физика в сельском хозяйстве: Пособие для учащихся. М.: Просвещение, 1977. - 160 с.
11. Хорошавин С.А. Физико-техническое моделирование. - М.: Просвещение, 1983.
12. Низемов И.М. Задачи по физике с техническим содержанием. Москва. Просвещение, 1980г
13. Усова А.В., Антропова Н.С. Связь преподавания физики в школе с сельскохозяйственным производством. - М.: Просвещение, 1976. - 140 с.
14. Мир физики. Занимательные рассказы о законах физики: Сост. Ю. И. Смирнов. - СПб.: ИКФ «МиМ-Экспресс», 1995
15. Занимательная физика, Гидродинамика, Манга, Масахиро Т., 2015
16. «Понятная физика: учебное пособие /И. Джавадов»: – Написано пером; Санкт-Петербург; 2014 ISBN 978-5-00071-127-9
17. Блумфилд Луис. Как все работает. Законы физики в нашей жизни М.: АСТ, CORPUS, 2016. — 704 с. — ISBN 978-5-17-085430-1.
18. Асламазов Л.Г., Варламов А.А. Удивительная физика.– М.: Добросвет, 2002. — 236 с: ил.
19. Роджерс Э. Физика для любознательных. Том 1. Материя, движение, сила. М.: Мир, 1969

20. Китайгородский А.И. Физика - моя профессия. М.: Молодая гвардия, 1965
21. Дмитриев Б.М. Что такое движение (2-е изд.) К.: Истина, 2003
22. Анфилов Г.Б. Бегство от удивлений. Книга для юных любителей физики с философским складом ума (2-е изд.) М.: Дет. лит., 1974
23. Бутиков Е.Н. Кондратьев А.С. Физика: Уч. пособие: В 3 кн. Кн.1. Механика. – М.: Физматлит, 2008–352 с. – ISBN 978-5-9221-0107-3 (Кн.1)
24. Серия «Мир физики и техники» разных авторов 10 книг.
25. Ядерные излучения в науке и технике. М. Наука, 1984.
26. Лисовский Л. П., Саломонович А. Е. Трение в природе и технике. – М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1948. – 52 с.
27. Хайкин С.Э. Физические основы механики [Текст] Уч. пособие. 3-е изд., стер. Издательство "Лань" 2008.– 768 с: ил. ISBN 978-5-8114-0895-5
-

## Содержание

Введение.....	5
Тема 1. Силы в механике. Сложение и разложение сил в механизмах. Бесконечно большие силы. Центр тяжести. Вращения тела под действием пары сил. Передача усилий. Большие механизмы.....	7
Тема 2. Упругие силы и использование их в технике. Упругое последствие. Реологические свойства. Удар. Коэффициент восстановления. Использование энергии удара. Ударные механизмы в технике.....	16
Тема 3. Сила трения. Формула Кулона - Амантона и ее следствия. Экспериментальное определения коэффициентов трения и применение в технике. Конус трения. Использование в технике. Болтовые соединения и самоконтрящиеся гайки. Применение в механизмах. Формула Эйлера. Передача усилий гибкими связями. Ременные и тросовые передачи.....	28
Тема 4 Явление застоя в технике. Влияние явления застоя на чувствительность приборов. Физика движения транспортных средств. Сила тяги и сцепной вес. Работа тормозов. Занос транспорта.....	49
Тема 5. Приработка механизма и износ. Изменение силы трения. Жидкое трение. Физика применения смазочных материалов. Жидкая и твердая смазка.....	63
Тема 6. Механическая энергия и методы её аккумуляирования. Принципы аккумуляирования механической энергии.....	69
Тема7. Колебания в технике. Сложение колебаний и резонанс. Вибрация. Вибрационное сглаживание и вибротранспорт. Фрикционные автоколебания. Инфразвук и ультразвук. Использование и учет в технике.....	80
Тема 8. Силы инерции в технике. Центробежные силы в технике.....	99
Тема 9. Вращательное движение и его использование в технике. Свободные оси. Устойчивость свободного вращения. Виды неуравновешенности механизмов. Понятие о балансировке.....	108
Тема 10. Гидростатика. Плавание тел. Дымовые трубы. Гидравлические и пневматические машины. Гидродинамика. Уравнение Бернулли и его использование в технике. Инжектор и карбюратор. Аэродинамическое сопротивление.....	117
Тема 11 Смачивание и не смачивание. Капиллярные явления. Использование в технике. Физика процессов склеивания, пайки и сварки.....	135
Тема 12. Тепловые явления. Тепловое расширение. Теплопередача.....	142

Тема 13. Применение электризации в технике. Применение законов Ома и Кирхгофа в технике .....	151
Тема 14 Магнитные свойства тока. Электромагнитная индукция. Эффект Холла. Электромагниты и их применение в автоматике и в технике.....	165
Тема 15. Оптика и ее применение в технике и быту.....	174
Тема 16 Применение радиоактивных веществ в технике. Использование радиоизотопов для определения уровня жидкости. Самосветящиеся краски и материалы. Использование радиоактивных изотопов для контроля износа и в качестве сигнализаторов износа. Гамма дефектоскопия.....	188
Список использованных источников.....	197