Свободные колебания груза, прикреплённого к пружине, или маятника являются гармоническими лишь в том случае, когда нет трения. Но силы трения, или, точнее, силы сопротивления окружающей среды, хотя, может быть, и малые, всегда действуют на колеблющееся тело.

Затухающие колебания. Обратимся к эксперименту, схематично изображённому на рисунке 3.1. Трение и сопротивление воздуха препятствуют движению шарика. Направление силы сопротивления как при движении шарика вправо, так и при его движении влево всё время противоположно направлению скорости. Размах его колебаний постепенно будет уменьшаться до тех пор, пока движение не прекратится. При малом трении затухание становится заметным лишь после того, как шарик совершит много колебаний. Если наблюдать движение шарика на протяжении не очень большого интервала времени, то затуханием колебаний можно пренебречь. В этом случае влияние силы сопротивления на движение можно не учитывать.

Если же сила сопротивления велика, то пренебречь её действием даже в течение малых интервалов времени нельзя. Опустите шарик на пружине в стакан с вязкой жидкостью, например с глицерином (рис. 3.7). Если жёсткость пружины мала, то выведенный из положения равновесия шарик совсем не будет колебаться. Под действием силы упругости он просто вернётся в положение равновесия (штриховая линия на рисунке 3.7). За счёт действия силы сопротивления скорость его в положении равновесия будет практически равна нулю.

Силы сопротивления совершают отрицательную работу и тем самым уменьшают механическую энергию системы. Поэтому с течением времени максимальные отклонения тела от положения равновесия становятся всё меньше и меньше. В конце концов, после того как запас механической энергии окажется исчерпанным, колебания прекратятся совсем.

Колебания при наличии сил сопротивления являются затухающими.

График зависимости координаты тела от времени при затухающих колебаниях изображён на рисунке 3.8. Подобный график может вычертить само колеблющееся тело, например маятник.

На рисунке 3.9 изображён маятник с песочницей. Маятник на равномерно движущемся под ним листе картона струйкой песка вычерчивает график зависимости своей координаты от времени. Это простой метод временной развёртки колебаний, дающий достаточно полное представление о процессе колебательного движения. При небольшом сопротивлении затухание колебаний на протяжении нескольких периодов мало. Если же к нитям подвеса прикрепить лист плотной бумаги для увеличения силы сопротивления, то затухание станет значительным.

Вынужденные колебания. Большое значение имеют незатухающие колебания — те, которые могут длиться неограниченно долго.

Самый простой способ возбуждения незатухающих колебаний состоит в том, что на систему воздействуют внешней периодической силой.

Вынужденными называются колебания, происходящие под действием внешней периодической силы.

Работа внешней силы над системой обеспечивает приток энергии к системе извне, что не даёт колебаниям затухнуть, несмотря на действие сил трения.

Особый интерес представляют вынужденные колебания в системе, способной совершать почти свободные колебания. С этим случаем знакомы все, кому приходилось раскачивать ребёнка на качелях.

Качели — это маятник, т. е. колебательная система с определённой собственной частотой. Отклонить качели на большой угол от положения равновесия с помощью постоянной во времени небольшой силы невозможно. Не удаётся раскачать качели и в том случае, если их беспорядочно подталкивать в разные стороны. Однако если начать в правильном ритме подталкивать качели вперёд каждый раз, когда они поравняются с нами, то можно и без большого напряжения раскачать их очень сильно. Правда, для этого потребуется некоторое время. Каждый толчок сам по себе может быть незначительным. После первого толчка качели будут совершать лишь очень малые колебания. Но если темп этих колебаний п внешних толчков один и тот же, то второй толчок будет своевременным и усилит действие первого. Третий усилит колебания ещё больше и т. д. Эта возможность значительного увеличения амплитуды колебаний системы, способной совершать почти свободные колебания, при совпадении частоты внешней периодической силы с собственной частотой колебательной системы и представляет особый интерес.

Вынужденные колебания шарика, прикреплённого к пружине. Рассмотрим вынужденные колебания в системе, обладающей собственной частотой колебаний. Вместо маятника удобнее взять шарик, прикреплённый к пружине. Пусть конец одной из пружин будет прикреплён к нити, перекинутой через блок (рис. 3.10), а нить соединена со стерженьком на диске. Если вращать диск с помощью электродвигателя, то на пружину начнёт действовать периодическая внешняя сила.

Постепенно под действием пружины шарик начнёт раскачиваться. При этом амплитуда колебаний будет нарастать. Спустя некоторое время колебания приобретут установившийся характер: их амплитуда перестанет изменяться со временем. Причём можно обнаружить, что частота колебаний шарика (частоту вынужденных колебаний будем обозначать буквой ю в отличие от частоты собственных колебаний системы со0) равна частоте колебаний конца А пружины, т. е. частоте изменения внешней силы. (Эта частота равна числу оборотов диска в секунду.)

При установившихся вынужденных колебаниях частота колебаний всегда равна частоте внешней периодически действующей силы.

Резонанс. Пользуясь установкой, изображённой на рисунке 3.10, выясним, как амплитуда установившихся вынужденных колебаний зависит от частоты внешней силы. Плавно увеличивая частоту внешней силы, мы заметим, что амплитуда колебаний постепенно возрастает. Она достигает максимума, когда внешняя сила действует в такт со свободными колебаниями шарика.

При дальнейшем увеличении частоты амплитуда установившихся колебаний уменьшается. Зависимость амплитуды колебаний от частоты изображена на рисунке 3.11. При очень больших частотах внешней силы амплитуда вынужденных колебаний стремится к нулю с ростом частоты, так как тело вследствие своей инертности не успевает заметно смещаться за малые промежутки времени и «дрожит на месте».

Резкое возрастание амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частоты изменения внешней силы, действующей на систему, с частотой её свободных колебаний называется резонансом (от латинского слова resonans — дающий отзвук).

При резонансе амплитуда вынужденных колебаний максимальна из-за того, что на протяжении всего периода направление внешней силы совпадает с направлением скорости колеблющегося тела, поэтому эта сила совершает только положительную работу. При установившихся колебаниях положительная работа внешней силы равна по модулю отрицательной работе силы сопротивления.

Если частота внешней силы не равна собственной частоте со0 колебаний системы, то внешняя сила лишь в течение части периода совершает положительную работу. В течение же другой части периода направление силы противоположно направлению скорости и работа внешней силы будет отрицательной. В результате работа внешней силы за период невелика и соответственно невелика и амплитуда установившихся колебаний. Существенное влияние на резонанс оказывает трение в системе. Чем меньше коэффициент трения, тем больше амплитуда установившихся колебаний.

Изменение амплитуды вынужденных колебаний в зависимости от частоты при различных коэффициентах трения и одной и той же амплитуде внешней силы изображено на рисунке 3.12. Кривой 1 соответствует минимальное трение, а кривой 3 — максимальное. На этом рисунке хорошо видно, что возрастание амплитуды вынужденных колебаний при резонансе выражено тем отчётливее, чем меньше трение в системе.

При малом трении резонанс «острый», а при большом — «тупой».

Если частота со колебаний далека от резонансной, то амплитуда колебаний мала и почти не зависит от силы сопротивления в системе.

В системе с малым трением амплитуда колебаний при резонансе может быть очень большой даже в том случае, когда внешняя сила мала. Но большая амплитуда устанавливается только спустя продолжительное время после начала действия внешней силы. В соответствии с законом сохранения энергии вызвать в системе колебания с большой амплитудой, а значит, сообщить системе большую энергию небольшой внешней силой можно только за продолжительное время. Если трение велико, то амплитуда колебаний будет небольшой и для установления колебаний не потребуется много времени.

Воздействие резонанса и борьба с ним. Любое упругое тело, будь то мост, станина машины, её вал, корпус корабля, представляет собой колебательную систему и характеризуется собственными частотами колебаний. При работе двигателей нередко возникают периодические дополнительные напряжения, связанные с движением частей двигателя (например, поршней) или с недостаточно точной центровкой их вращающихся деталей (например, залов). Если частота этих периодических напряжений совпадает с частотой свободных колебаний системы, то возникает резонанс. Амплитуда колебаний может возрасти настолько, что возможна поломка машин, хотя напряжение з материале и не превышает предела прочности при статических нагрузках.

Во всех этих случаях принимаются специальные меры, чтобы не допустить наступления резонанса или ослабить его действие. Известны случаи, когда приходилось перестраивать океанские лайнеры, чтобы уменьшить вибрацию.

При переходе через мост воинским частям запрещается идти в ногу. Строевой шаг приводит к периодическому воздействию на мост. Если случайно частота этого воздействия совпадёт с собственной частотой колебаний моста, то он может разрушиться.