

## Свободные затухающие колебания. Вынужденные механические колебания.

**Свободные колебания могут совершаться за счет первоначального запаса энергии.** Вернемся к предыдущим рассуждениям: в первом примере, который мы приводили, это была первоначальная энергия грузика, мы выводили его из положения равновесия, а потом отпускали. А во втором случае этот первоначальный запас энергии – это кинетическая энергия (в случае, когда мы толкали грузик). Согласно закону сохранения энергии в обоих случаях сумма кинетической и потенциальной энергий маятника должна оставаться неизменной с течением времени. То есть, какое бы промежуточное значение маятника мы бы ни рассмотрели, в любой из них эта сумма равна начальной энергии маятника (см. рис. 6), при этом маятник мог совершать колебания довольно долго.

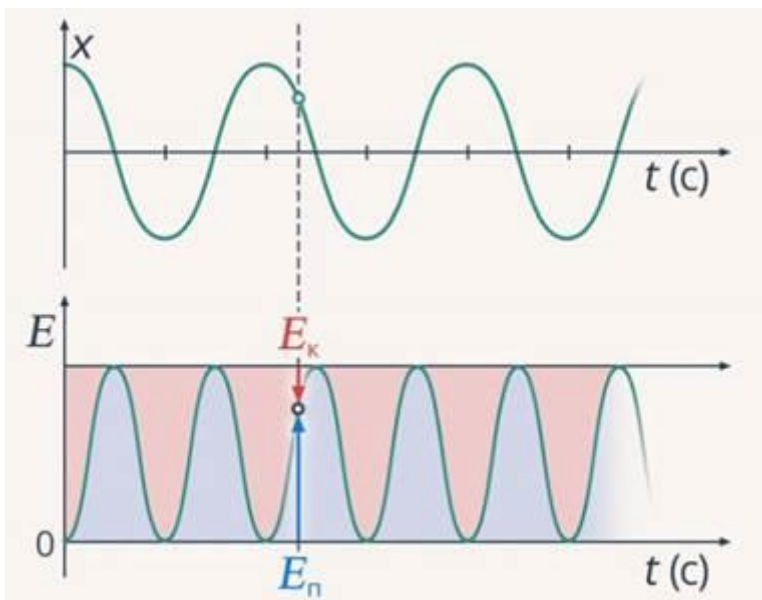


Рис. 6. Иллюстрация закона сохранения энергии

Однако на самом деле мы понимаем, что маятников, которые могли бы совершать колебания довольно долго, не существует – это какая-то абстракция.

Учтём, что система маятников незамкнутая, то есть в системе присутствует сила трения. В реальных условиях мы можем взять тяжелый груз, повесить его на очень длинную и легкую нить или проволоку, закрепить один конец на опоре и получить систему, близкую по своим свойствам к математическому маятнику. Однако нельзя сказать, что механическая энергия такого маятника будет сохраняться – мы прекрасно знаем, что рано или поздно он остановится. В чем же наша недоработка? Ответ прост: **в данной системе присутствуют различные виды трения, действие которых приводит к потере на каждом периоде колебаний маятника какой-то части его энергии** (см. рис. 7).

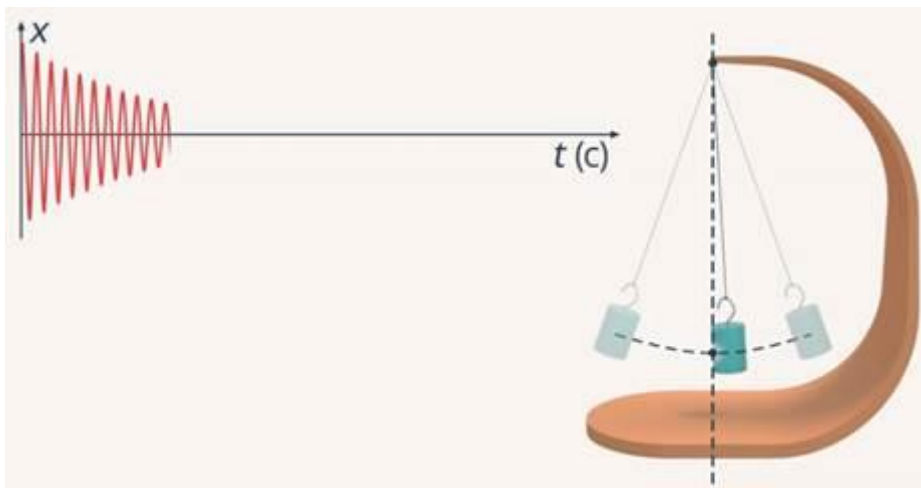


Рис. 7. В системе присутствуют различные виды трения

Силы трения могут быть внутренними (например, в подвесе маятника), а могут быть и внешними (например, со стороны окружающего воздуха или другой среды, в которой может находиться маятник). Естественно, что силы трения зависят от свойств среды: в воде колебания будут затухать быстрее, чем в воздухе (см. рис. 8).

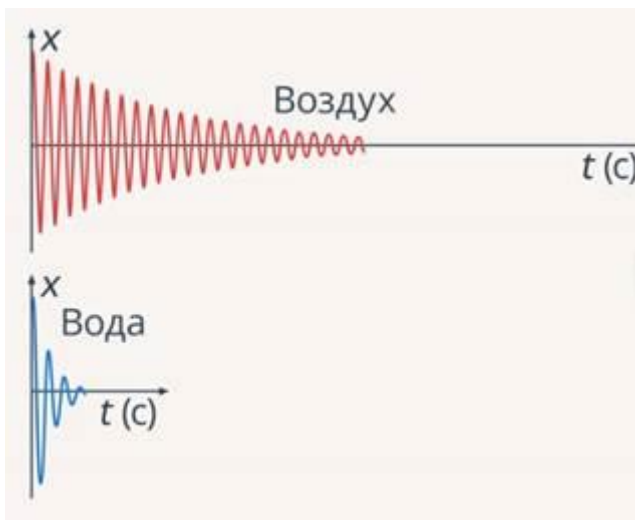


Рис. 8. Затухание в воздухе и воде

В итоге амплитуда колебаний будет постепенно уменьшаться, и в конце маятник остановится. На рисунке представлены смещения груза маятника от времени: видно, что амплитуда постепенно уменьшается, стремясь к нулю, такие колебания называются **затухающими** (см. рис. 8).

**Затухающие колебания** – это колебания, которые происходят в незамкнутой системе, то есть колебания, которые происходят, в том числе, под действием силы трения. Амплитуда таких колебаний постепенно затухает. Большинство колебаний в мире – затухающие, так как в окружающем нас мире, постоянно существуют силы трения.

## Вынужденные колебания

Итак, мы выяснили: в реальности колебания маятников механических систем затухающие, то есть их амплитуда постепенно уменьшается, стремясь к нулю. Что же нам сделать, чтоб колебания не были такими, чтоб амплитуда постоянно поддерживала свое значение? Для этого нам необходимо разомкнуть систему и подкачивать энергию извне. Таким образом, мы добьемся незатухающих колебаний. Как же разомкнуть систему?

Вспомним простой пример из жизни: катание на качелях. Для того чтобы качели колебались без остановки, человек периодически толкает их, а если перевести это на язык физики, то человек действует на качели с силой, величина которой зависит от времени периодическим образом. Если построить график зависимости модуля силы от времени, то получим следующий результат: сила зависит от времени периодически (см. рис. 9).



Рис. 9. Зависимость силы от времени

Мы прекрасно понимаем, что если мы будем воздействовать на качели постоянно, то они не будут колебаться.

Колебания системы, совершающие ею под действием внешней периодической силы, называются **вынужденными**. Силу, являющейся мерой этого внешнего воздействия, называют **вынуждающей**. При этом, как вы понимаете, мы уже не можем считать систему замкнутой, то есть в системе уже не совершаются свободные колебания – в системе совершаются вынужденные колебания. Примерами систем, в которых совершаются вынужденные колебания, могут быть также привычные вам часы – это могут быть настенные маятниковые часы, а могут быть и обычные пружинные механические часы. В каждом таком случае колебания совершаются за счет подвода энергии извне.

## Вынужденные колебания

Самым простым видом колебаний являются свободные незатухающие колебания. О них подробнее мы говорили на предыдущих занятиях. Давайте поговорим о некоторых характерных особенностях затухающих колебаний и вынужденных колебаний. Начнем с затухающих колебаний. Как вы уже знаете, любая реальная колебательная система – затухающая, ведь нам всегда приходится преодолевать силу трения или силу сопротивления. Если мы говорим об электромагнитных колебаниях, то там тоже есть факторы, вызывающие их затухания, – это сопротивление проводников.

Итак, как же выглядят затухающие колебания? Если вывести маятник из положения равновесия, то со временем его колебания затухают, здесь два основных фактора: **сопротивление воздуха, а также трение в подвесе**. Здесь речь идет об амплитуде колебаний, то есть максимальном отклонении от положения равновесия. Со временем амплитуда становится все меньше, меньше и меньше – именно этот факт отображен на рисунке (см. рис. 10).

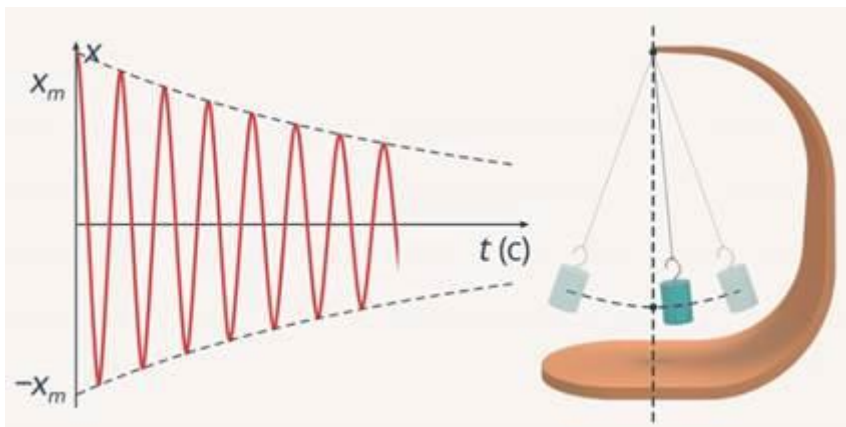


Рис. 10. Уменьшение амплитуды колебаний

**Обратите внимание: колебания все равно остаются периодическими, но амплитуда непрерывно уменьшается – колебания затухают.** Хорошо это или плохо – смотря для чего. Если речь идет о часах, то плохо, поскольку хотелось бы, чтоб затухание было как можно меньше, а колебания – больше, чтобы нам не доводилось подводить дополнительную энергию. Но есть и обратная сторона: если распахнуть двери и бросить их, то нам будет хотеться, чтобы они колебались как можно меньше. Для этого на двери ставят демпферы – гасители колебаний.

Теперь переходим к вынужденным колебаниям. Представим себе, что мы раскачиваем брата или сестру на качелях: если мы толкнем качели один раз, то они рано или поздно остановятся. Поэтому мы продолжаем раскачивать качели, и тем самым колебания из свободных становятся вынужденными, потому что

появляется некая внешняя сила. Какой же характеристикой должна обладать эта внешняя сила? Эта сила обязательно должна меняться во времени, должна быть периодической. И тут нужно поговорить о двух частотах: собственная частота колебаний  $\omega_0$  – та частота, с которой бы колебалась система, если бы она была выведена из равновесия и больше её никто не сообщал её энергию (то есть никто бы больше не раскачивал её), и частота внешней силы  $\omega$  – это та частота, с которой будут раскачивать качели. Запомните, чтобы колебания были вынужденными, внешняя сила должна периодически меняться.

Во время затухающих колебаний энергия системы непрерывно уменьшается, а во время вынужденных колебаний энергия подводится к системе извне.

### **Резонанс**

Приведем исторический факт: в Петербурге сильно раскачался и в результате обвалился Египетский мост (см. рис. 11).



Рис. 11. Обвал Египетского моста

В это время по мосту маршевым шагом, то есть в ногу, проходил кавалерийский эскадрон. Почему же в данном случае вынужденные колебания (а именно: воздействие эскадрона и вызвало вынужденные колебания) привели к разрушению моста? Ответим на этот вопрос. На рисунке изображены два маятника, висящие на общем шнуре (см. рис. 12).



Рис. 12. Два маятника на шнуре

Длина второго маятника неизменная. Этой длине соответствует определенная частота свободных колебаний, назовем её собственной частотой маятника. Длину первого маятника можно менять, подтягивая свободные концы его нити. При изменении длины нити 1, меняется его собственная частота. Если отклонить первый маятник от положения равновесия и предоставить его самому себе, то он будет совершать свободные колебания. Это вызовет колебания шнура, в результате чего на маятник 2 через его точки подвеса будет действовать вынуждающая сила, которая периодически меняется по модулю и направлению с такой же частотой, с которой колеблется первый маятник. Под действием этой силы второй маятник будет совершать вынужденные колебания (см. рис. 13).

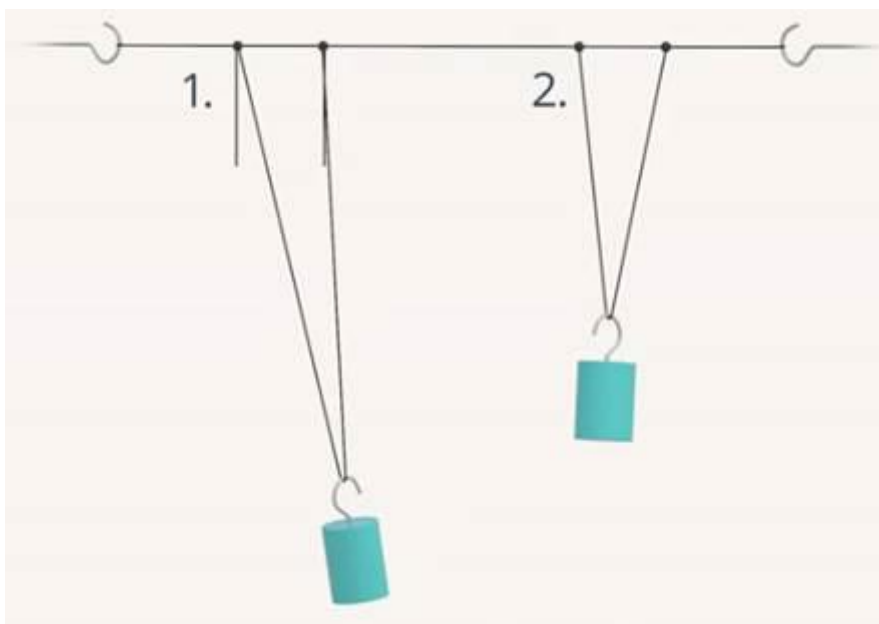


Рис. 13. Второй маятник начинает совершать вынужденные колебания

Начнем уменьшать длину первого маятника – частота его колебаний, а значит, и частота изменения вынуждающей силы, действующей на второй маятник, будет увеличиваться, приближаясь к собственной частоте второго маятника (см. рис. 14).

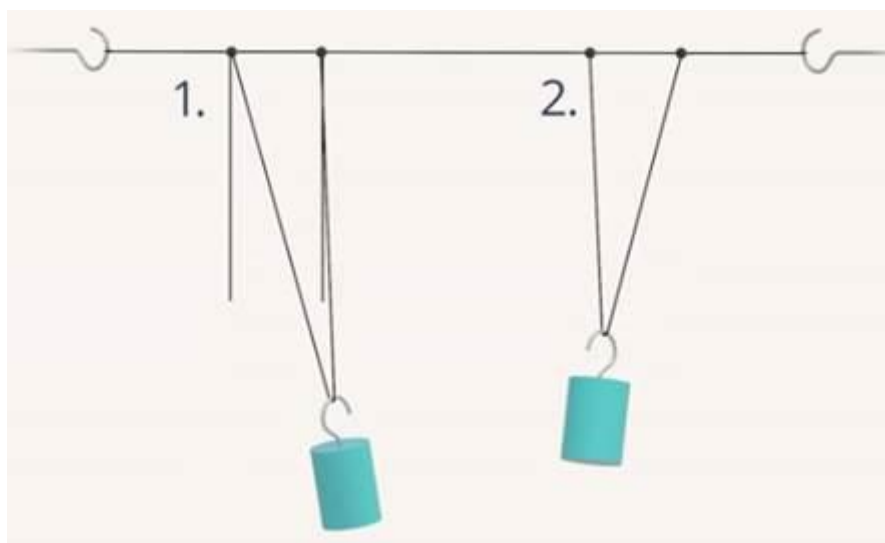


Рис. 14. Уменьшаем длину первого маятника

При этом можно увидеть, что амплитуда установившихся вынужденных колебаний второго маятника будет возрастать (см. рис. 15).

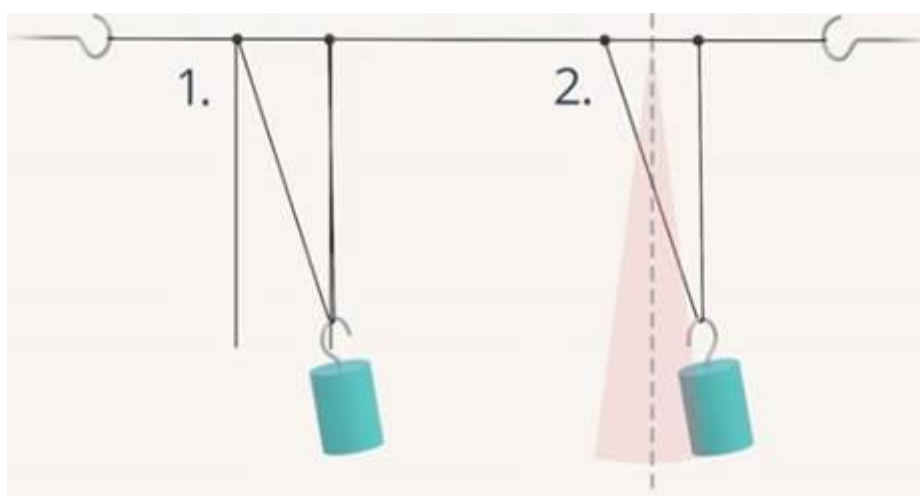


Рис. 15. Возрастание амплитуды второго маятника

В момент, когда длины маятников сравняются, то есть когда частота  $\nu$  вынуждающей силы совпадет с собственной частотой  $\nu_0$  второго маятника, амплитуда колебаний достигнет максимального значения. Если и в дальнейшем уменьшать длину первого маятника, то это приведет к тому, что частота вынуждающей силы станет больше собственной частоты второго маятника – амплитуда колебаний начнет уменьшаться (см. рис. 16).

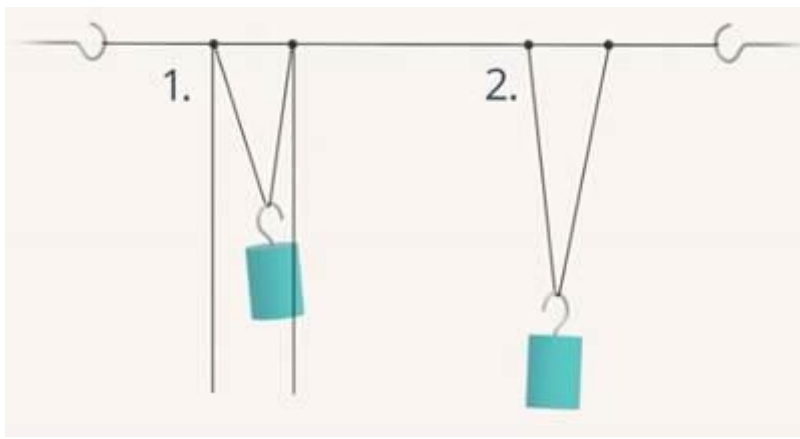


Рис. 16. Уменьшение амплитуды колебаний

Можно обратиться к графику зависимости амплитуды колебаний от частоты внешней вынуждающей силы (см. рис. 17), в данном случае частоты колебания маятника 1.

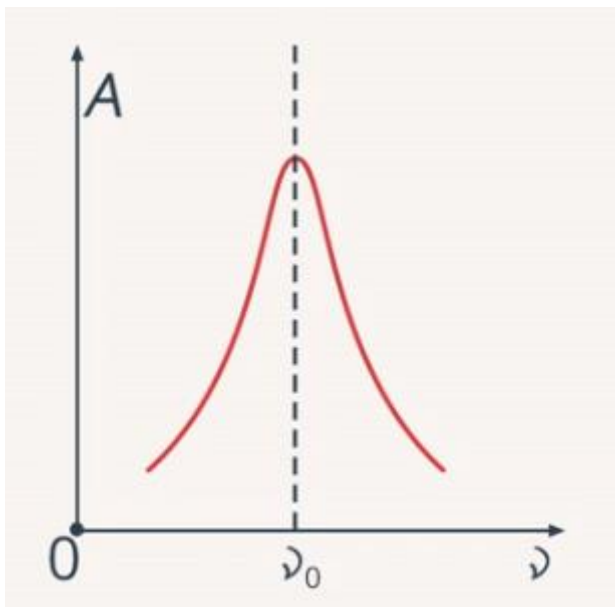


Рис. 17. Зависимость амплитуды от частоты

Обратите внимание, когда частота внешней силы совпала с собственной частотой колебаний, значение амплитуды максимально – амплитуда резко возросла. **Вывод: амплитуда установившихся вынужденных колебаний достигает своего наибольшего значения при условии, что частота вынуждающей силы равна собственной частоте колебательной системы. Это явление называется резонансом.**

## Резонанс

При изучении вынужденных колебаний можно столкнуться с очень интересным явлением – резонансом. Все дело в том, что, когда говорили о вынужденных колебаниях, мы ввели понятие двух частот: частота внешней силы



(обозначили  $\omega$ ) и собственная частота колебательной системы ( $\omega_0$ ). В зависимости от соотношения между этими частотами, колебания могут протекать по-разному. У системы есть собственная частота колебаний – частота, с которой колеблется система, если её не трогать (груз, подвешенный к маятнику); есть также внешняя – та частота, с которой влияют на систему (раскачивают груз, который подвешен к маятнику). Можно раскачивать груз с разной частотой, но от этого колебания не станут больше, амплитуда не увеличилась, можно раскачивать систему очень редким касанием о груз – в этом случае тоже колебания далеко не оптимальные. Очевидно, существует какое-то соотношение между частотой собственной и частотой внешней силы.

Посмотрим на график зависимости амплитуды колебаний от частоты внешней вынуждающей силы (см. рис. 17) и увидим, что в момент, когда амплитуда максимальная, частота внешней силы равна собственной частоте колебаний, то есть явление резкого роста амплитуды при совпадении частоты внешней силы и собственной частоты колебаний. Это и есть явление резонанса.

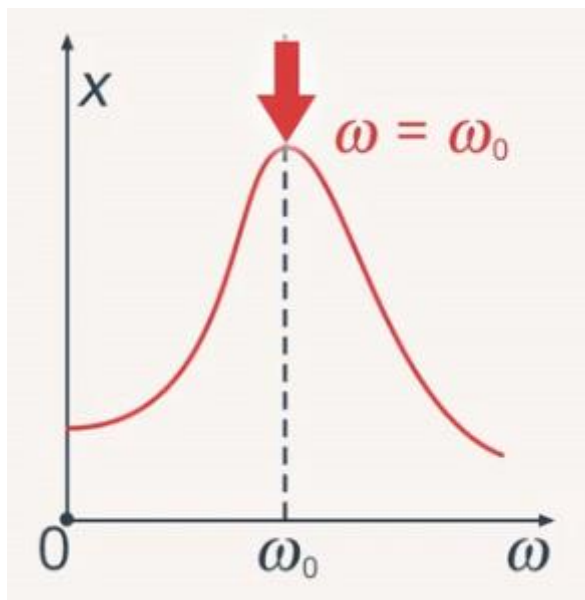


Рис. 18. Зависимость амплитуды колебаний от частоты

Амплитуда резко возрастает, энергия резко приходит в систему – и колебания резко увеличиваются. Резонанс встречается в технике, например, при устройстве частотомера язычкового (см. рис. 19), также резонанс получил распространение в медицине (МРТ).

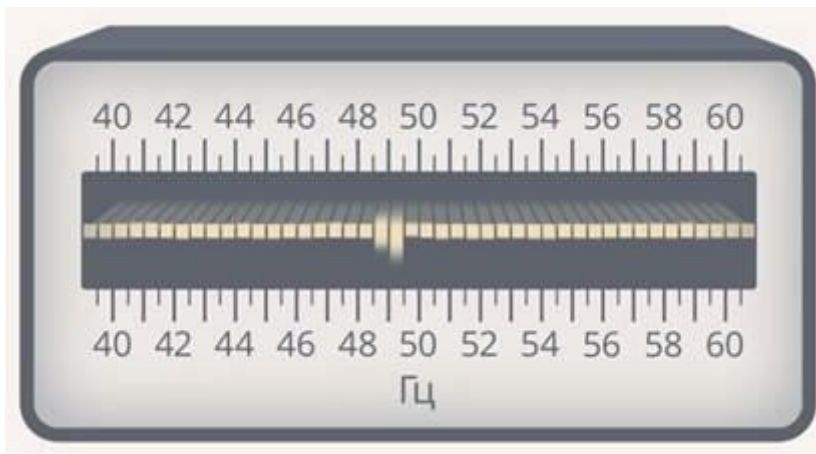


Рис. 19. Частотомер язычковый

Почему же наступает резонанс? Почему амплитуда резко возрастает при совпадении частоты внешней силы и собственной частоты колебаний системы?

В случае резонанса направление вынуждающей силы в любой момент времени совпадает с направлением движения колеблющегося тела, таким образом, создаются наиболее благоприятные условия для пополнения энергии колебательной системы за счет работы вынуждающей силы. Например, чтобы сильнее раскачать качели, мы подталкиваем их таким образом, чтобы направление действующей силы совпадало с направлением движения качели. Важно помнить, что явление резонанса имеет отношение только к вынужденным колебаниям, то есть когда есть внешняя периодическая вынуждающая сила.

А теперь вернемся к примеру с мостом. Понятно, что мост раскачался до большой амплитуды вследствие того, что частота его собственных колебаний совпала с частотой внешнего воздействия, то есть частотой шагов эскадрона. Безусловно, это случайное совпадение, однако аварию можно было предотвратить, если перед входом на мост была бы отдана команда «идти не в ногу», то есть идти вразнобой.

Нельзя говорить, что резонанс только плохое явление: например, если стоит задача минимальными усилиями добиться максимального размаха колебаний (раскачивание языка колокола (см. рис. 20)), то необходимо добиться частоты вынуждающей силы и собственной частоты, то есть использовать резонанс.



Рис. 20. Раскачивание языка колокола

Пример негативного действия резонанса: раскачивание ж/д вагона при совпадении частоты ударов колес о стыки рельсов с собственной частотой колебаний вагона. При этом необходимо устранить вероятность возникновения резонанса, то есть изменить скорость движения поезда.

**Посмотрите презентацию, выложенную отдельно, и видео на ютубе: «Резонанс»**

**Задания для выполнения в рабочих тетрадях**

**Внимательно ознакомьтесь с предложенным материалом.**

**Законспектируйте основные моменты**

**Проверка задания:**

**Пересылать выполненные работы на мою электронную почту**

**[alyona.makhrova@yandex.ru](mailto:alyona.makhrova@yandex.ru)**

**или в «Сферум»**