

ТАКОМСКИЙ МОСТ И ВЫНУЖДЕННЫЙ МЕХАНИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС

А.С. Шагиева, студентка гр. 4Д01

Томский политехнический университет, 634050, г.Томск, пр.Ленина,30

E-mail: cms1@tpu.ru

Вынужденный резонанс - это резкое возрастание амплитуды вынужденных колебаний при сближении частоты внешней силы с собственной частотой колебания тела. Такомский мост (или мост Такома-Нэрроуз) - висячий мост в США, который был разрушен ветром в 1940 году всего лишь спустя четыре месяца после ввода в эксплуатацию. Киноплёнка запечатлела, как он раскачивается, после чего его массивная часть обрушивается в воду. Наиболее популярная версия произошедшего гласит, что Такомский мост был разрушен резонансными вибрациями: вихри, создаваемые ветром, дующим через мост, происходили на частоте, которая соответствовала естественной частоте колебаний моста. Но как показывают более детальные исследования катастрофы, главной причиной разрушения выступил не резонанс.

Мост Такома стал местным аттракционом: доска моста поднималась и опускалась из-за мягкого ветра той местности каждые несколько секунд, что привлекало внимание туристов. Рабочие, которые строили Такома-Нэрроуз, дали ему прозвище «галопирующая Гертруда». Причиной «галопов» моста действительно был резонанс. Мост состоял из горизонтальной доски и двух вертикальных панелей по бокам (все они были прикреплены к двум большим башням с помощью запутанного клубка проводов), так что в поперечном сечении у нас была бы Н-образная фигура, с горизонтальным ходом намного длиннее вертикальных. Ветер дул поперечно (для визуализации представим, что слева направо). Когда он натыкался на левую панель, он разворачивается в два воздушных потока, которые проходят через мост. Но так как мосту не хватало аэродинамической линии (изогнутой линии, позволяющей конструкции перемещаться через воздух с минимальным поверхностным трением), воздух образовывал вихри сверху, а также снизу. В результате мост совершал колебания вверх и вниз, напоминающие галоп. Каждый раз, когда вихрь покидает мост сверху, он создает силу сверху вниз; когда он делает это снизу, сила имеет противоположный смысл. Оба вихря образуются в разные моменты времени, сочетание обоих является периодической силой, называемой частотой Строухала. Если она соответствует естественной частоте моста (или, скорее, одной из его естественных частот, так как сложный объект имеет более одной), у нас будет резонанс. Моделирование моста, проведенное позже в аэродинамической трубе, показало, что окружающий ветер дул с частотой между 0,13-0,3 Гц, и это как раз примерно соответствовало частоте, с которой «галопировал» Такомский мост (между 0,1 и 0,2 Гц, в зависимости от скорости ветра).

Резонанс, вызванный вихрями, объясняет вертикальные движения моста, но он не может объяснить его крушение. Ведь частота ветра в утро падения Такомского моста (частота Строухала) была 1 Гц, а сам мост, как уже было сказано, колебался с совсем другой частотой 0,2 Гц, отличающейся в пять раз. Результаты исследования, проведенного для выяснения причин, показывают, что есть эффект кручения при 0,2 Гц, тем более сильный, чем выше скорость ветра. Таким образом, эксперимент с аэродинамической трубой показывает, что мост должен был сломаться, что он и сделал. Но это не было резонансным явлением. [1]

Главной причиной крушения моста Такома-Нэрроуз было аэродинамическое самовозбуждение - возникновение в системе колебаний при отсутствии внешних воздействий. Как уже было написано выше, вихри создавались как над мостом, так и под ним, создавая на нем вертикальное движение. Теперь важно то, что они также вызывали

вращательное движение, то есть кручение. Рассмотрим рисунок 1. Допустим, ветер начинает наклонять мост по часовой стрелке. Теперь левый вертикальный ход нашей «буквы Н» выше, чем правый. Следствием этого является то, что ветер, идущий с левой стороны, создает сверху больший водоворот, чем снизу. Если скорость ветра невелика, вихрь будет проходить по мосту более одного периода кручения. То есть, пока вихрь находится на полпути, кручение моста изменит направление, и теперь на дне образуется вихрь. Эффект обоих завихрений отменяется. Но если ветер дует сильно, вихрь быстро пройдет по мосту и выйдет с правой стороны, прежде чем доска моста вернется к горизонтали. Когда кручение противоположно, это будет дно, которое создает вихрь. И тогда эффект завихрения усиливается. [2]

Это то, что произошло на мосту Такома-Нэрроуз. Каждый раз, когда он наклонялся вбок, возникали вихри, которые проявляли момент кручения, который все больше и больше скручивал мост. При каждом колебании кручение увеличивалось, что увеличивало размер вихрей, что, в свою очередь, увеличивало кручение и так далее. Как результат, произошла «перекачка» энергии ветра на мост. Всего за час накопленная кинетическая энергия разорвала мост. Описанное явление напоминает резонанс, но им не является. Условием резонанса является наличие периодической внешней силы с частотой, равной частоте результирующего движения, но частота ветра сильно отличалась от собственной частоты моста. В случае Такома-Нэрроуз частота колебаний моста является естественной частотой системы. А сама сила, ответственная за движение, действует как «антидиссипативная» сила, которая вводит энергию в систему, а не извлекает ее, то есть мост, в некотором смысле, толкает себя. Таким образом, аэродинамическое возбуждение имело место и являлось главной причиной разрушения Такома-Нэрроузского моста. [3]

В заключение можно сказать, что на протяжении всего существования мост Такома подвергался резонансу (колебался вертикально в результате эффекта вихрей). Но события последнего часа его жизни, которые закончились разрушением моста, связаны именно с феноменом аэродинамического самовозбуждения.

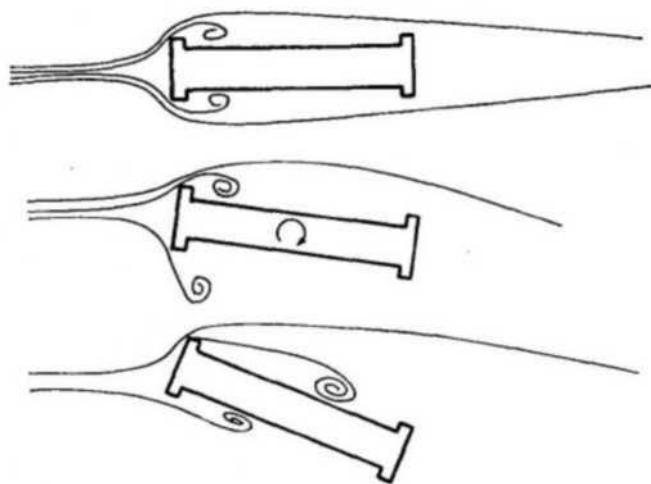


Рис. 1. Аэродинамическое самовозбуждение на примере Такома-Нэрроузского моста.

Список литературы:

1. Feldman, B. What to Say About the Tacoma Narrows Bridge to Your Introductory Physics Class // *The Physics Teacher*. - 2003. - 41 (2)
2. Billah, K. Resonance, Tacoma Narrows bridge failure, and undergraduate physics textbooks // *American Journal of Physics*. - 1991. - 59 (2)
3. Green, D., & Unruh, W. The failure of the Tacoma Bridge: A physical model // *American Journal of Physics*. - 2006. - 74 (8)