

## О ПРОБЛЕМЕ УЧЕТА КОЛЕБАНИЙ ПРИ РАСЧЕТЕ ИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

А.Е. ГРЫШАНКОВА, студент

Российский университет дружбы народов, Москва, Россия  
gris.anya2013@yandex.ru

*Проблеме учета колебаний при расчете инженерных конструкций не уделялось большого внимания до знаменитого крушения Такомского моста в США. В работе рассматриваются причины разрушения и некоторые принципы учета колебаний при расчете конструкций.*

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: колебания конструкции, безопасность конструкций, вертикальные и крутильные колебания, резонанс, напряжения.*

Колебания конструкций - многократно повторяющееся возвратно-поступательное или возвратно-вращательное движение элементов конструкций вследствие их упругих деформаций под действием сил, достаточно быстро меняющихся во времени.

При колебаниях конструкций элементы конструкций перемещаются относительно их устойчивого положения статического равновесия (колебания мостов, высотных сооружений, фундаментов машин и т.п.) или общего движения (колебания летательных аппаратов, вагонов, автомобилей и т.п.). Колебания конструкций классифицируются по нескольким признакам. По типу деформаций различают продольные (сжатия — растяжения), поперечные (изгибные, сдвиговые), крутильные и смешанные; по характеру перемещений во времени — периодические и непериодические.

Значительные колебания опасны для прочности и устойчивости конструкций, примером чего служат многочисленные разрушения зданий и сооружений при землетрясениях, поломки валов двигателей, случай разрушения вследствие колебаний под действием ветра Такомского висячего моста, сооруженного в США в 1940.

Систематические, даже умеренные колебания конструкций, безопасные для самой конструкции, могут вредно влиять на здоровье людей, а также на качество точных производственных процессов. Поэтому большое значение имеет борьба с колебаниями конструкций путем расчета конструкций на колебания при их проектировании и осуществление мероприятий с целью уменьшения колебаний. Вопросы расчёта конструкций на колебания и способы уменьшения колебаний конструкций рассматриваются в теории колебаний механических систем.

### **Трагедия на Такомском мосту (Рис.1).**

Такомский мост, или мост Такома-Нэрроуз — висячий мост в США, в штате Вашингтон, построенный через пролив Такома-Нэрроуз (часть залива Пьюджет-Саунд). Первоначальный вариант моста был спроектирован

Леоном Мойсейфом и открыт для движения 1 июля 1940 года. Еще во время возведения строители дали ему прозвище «Галопирующая Герти» (англ. Galloping Gertie) из-за того, что в ветреную погоду его дорожное полотно сильно раскачивалось (из-за малой высоты балки жесткости).

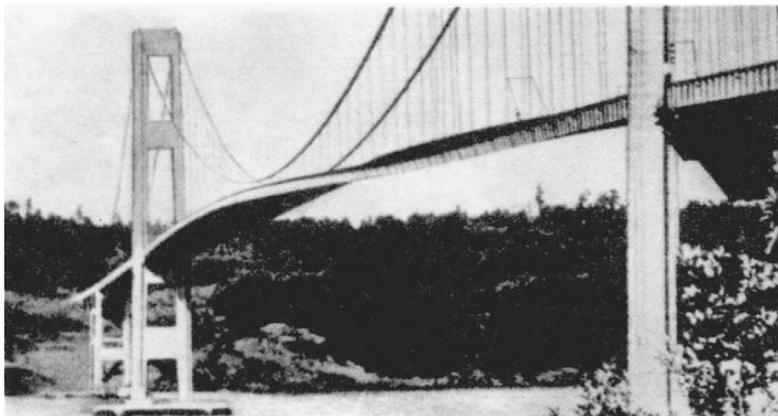


Рис.1. Такоумский мост

**Основные характеристики моста:** общая длина — 1810 м; длина центрального пролёта — 854 м; ширина — 11,9 м; диаметр основных (несущих) тросов — 438 мм; стрела провеса (разность между высотой троса у пилонов и высотой в точке его наибольшего провеса) — 70,7 м; пилоны — стальные на бетонных быках; высота балки жесткости — 2,44 м [1].

**Обрушение Такоумского моста.**

7 ноября 1940 года в 11:00 по местному времени при ветре скоростью около 65 км/час произошла авария, которая привела к разрушению центрального пролёта моста [2]. По счастью в это время движение через мост было весьма слабым и единственный водитель машины, оказавшейся на мосту, успел в последнюю минуту покинуть её и спастись бегством. Процесс разрушения был снят на 16-миллиметровую цветную киноплёнку Kodachrome. На основе съёмки был создан документальный фильм «The Tacoma Narrows Bridge Collapse» (1940), позволивший впоследствии подробно изучить процесс разрушения (Рис.2).

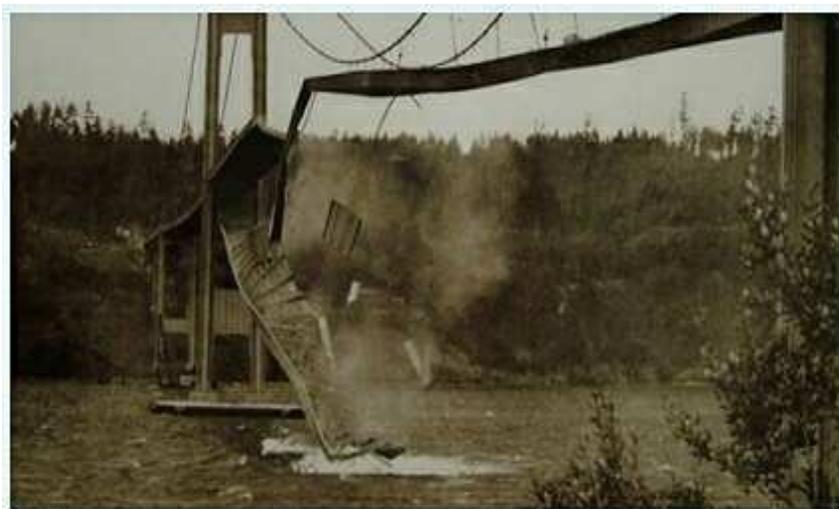


Рис.2. Обрушение Такомоского моста [1].

Авария моста оставила значительный след в истории науки и техники. Разрушение моста способствовало исследованиям в области аэродинамики и аэроупругости конструкций и изменению подходов к проектированию всех большепролетных мостов в мире, начиная с 1940-х годов. Во многих учебниках причиной аварии называется явление вынужденного механического резонанса, когда частота колебаний ветрового потока совпадает с собственной частотой колебаний конструкций моста. Более точно причиной стал аэроупругий флаттер (динамические крутильные колебания) из-за недоучета динамических ветровых нагрузок при проектировании сооружения [3].

**Процесс разрушения** описывается следующим образом. Обрыв подвесок центрального пролета повлек провисание боковых пролетов и наклон пилонов. Сильные вертикальные и крутильные колебания моста явились следствием чрезмерной гибкости конструкции и относительно малой способности моста поглощать динамические силы. Мост был запроектирован и правильно рассчитан на действие статических нагрузок, в том числе и ветровой, но аэродинамическое действие нагрузки не было учтено. Крутильные колебания возникли в результате действия ветра на проезжую часть около горизонтальной оси, параллельной продольной оси моста. Крутильные колебания усиливались вертикальными колебаниями тросов. Опускание троса с одной стороны моста и поднятие его с другой вызвали наклон проезжей части и породили крутильные колебания.

Демонтаж пилонов и боковых пролетов был начат вскоре после аварии и продолжался до мая 1943 года [4]. При строительстве нового моста

были использованы анкерные устои, быки (основания) пилонов и некоторые другие составные части старого моста. Полностью восстановленный мост (англ. Westbound bridge) был открыт 14 октября 1950 года и стал третьим на тот момент самым длинным висячим мостом в мире (общая длина — 1822 м, длина центрального пролета — 853 м). Для дополнительной устойчивости и снижения аэродинамических нагрузок в конструкцию нового моста были введены открытые фермы, стойки жесткости, деформационные швы и системы гашения вибраций. Пропускная способность моста — 60 тыс. автомобилей в сутки.

В 2002—2007 годах для увеличения пропускной способности шоссе рядом со старым был возведен еще один мост (англ. Eastbound bridge), имеющий общую длину 1645,9 м, длину центрального пролета 853,4 м и высоту пилонов 155,4 м.

После трагедии стало активно изучаться влияние колебаний при расчете инженерных конструкций. Так же одним из важных аспектов изучения стало явление резонанса.

#### **Влияние резонанса на величину напряжений.**

Если на балке расположена машина с вращающимся грузом, имеющим эксцентриситет по отношению к оси вращения (Рис.3), то сила инерции груза будет вызывать в балке напряжения и деформации, периодически меняющие свой знак [5].



Рис.3. Расчетная схема неуравновешенного ротора машины

будет совершать колебания с периодом, равным периоду вращения груза. Это будут так называемые вынужденные колебания. Если период вынужденных колебаний совпадет с периодом свободных колебаний стержня, то мы получим явление резонанса, при котором амплитуда (размах) колебаний будет резко расти с течением времени. Наличие сил трения, сопротивление воздуха и т. д. ограничивают на практике рост этой амплитуды; однако она может достичь очень большой величины, значительно превышающей те деформации, которые испытывала бы конструкция под действием ускорений той же величины, но не меняющих знака.

Известен случай, когда при резонансе угол закручивания вала увеличился в шесть раз по сравнению с тем углом, который был до наступления

резонанса, — это был случай поломки коленчатых валов двигателей «Цепелина» при первом его перелете через Атлантический океан.

Таким образом, явление резонанса, если оно длится некоторое время, а не сбивается немедленно по возникновении, ведет к постепенному росту деформаций и пропорциональных им напряжений в конструкции, что может вызвать поломку. Поэтому, как правило, при проектировании конструкций, испытывающих переменные ускорения с постоянным периодом, необходимо избежать возникновения явления резонанса.

Так как период раскачивающих (возмущающих) сил обычно является заданным, то в распоряжении проектировщика остается лишь период собственных свободных колебаний конструкции, который надо подобрать так, чтобы он в должной мере отличался от периода изменений возмущающей силы. Этот вопрос требует внимательного отношения и кажется интересным для углубленного изучения.

Таким образом, мы можем сделать вывод, что влияние колебаний конструкций – важная проблема при расчете и проектировании, и что этот вопрос активно изучается и на сегодняшний день.

#### Литература

1. <http://fizportal.ru/destruction-bridge>
2. <http://www.limejuice.ru/offtop/820-takomskijj-most.-istorija-odnoj-katastrofy..html>
3. <http://truba.com/video/108093>
4. *Дмитриев Ф.Д.* Крушения инженерных сооружений. – М: Гос. издат. лит. по строит. и арх., 1953 г. – 188с.
5. *Беляев Н.М.* Сопротивление материалов. М.: Гос. издат. техн.-теор. лит., 1954. – 856с.

#### PROBLEM OF VIBRATIONS IN CALCULATING ENGINEERING STRUCTURES

A.E. GRYSHANKOVA

*Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia*  
*gris.anya2013@yandex.ru*

*Accounting problems fluctuations when calculating engineering designs not pay more attention to the famous wreck of Tacoma Narrows Bridges in the United States. The paper discusses the reasons for failure and some accounting principles fluctuations in the calculation of structures.*

*KEYWORDS: design variations, safety - intercept kinds of structures, vertical and torsional vibrations, resonance, tension.*

