

РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ БАЛОЧНЫХ НЕРАЗРЕЗНЫХ МОСТОВ

Незримый «конфликт», который длится на протяжении веков между мировым инженерным сообществом и «архитектурно-эстетическим достоянием современности» – мостовыми сооружениями – вступил в новую фазу. На этот раз аэродинамическая неустойчивость – «болезнь» гибких вантовых и висячих мостов – поразила большепролетные балочные неразрезные конструкции.

Из-под контроля, похоже, вышли наиболее устойчивые и надежные мостовые сооружения. Наибольшую сенсацию произвели аномальные «танцы» Волгоградского моста в мае 2010 года, открывшие глаза инженерному сообществу на наличие проблем в поведении неразрезных балочных мостов при их взаимодействии с ветровым потоком. Причем, нужно заметить, что пример мостового перехода в Волгограде не единичен и не уникален: в новейшей истории мостостроения за последние полвека известны несколько аналогичных случаев поведения балочных неразрезных мостов.

Мост Rio-Niteroi (Бразилия). Этот балочный мост (рис. 1), перекрывающий залив Гуанабара в Бразилии, «танцует» с 1974 года. Наиболее подвержена этой напасти его центральная часть (200 м + 300 м + 200 м), представляющая собой неразрезную балочную систему из двухкоробчатых балок. Пролет, равный 300 м, признан самым длинным в мире для балочных мостов.



Рис. 1. Мост Rio-Niteroi.
Вид на центральные пролеты

Такая длина конструкций центральных пролетных строений и, как следствие, значительная их гибкость, а также низкие демпфирующие свойства приводят к тому, что на этой части сооружения периодически возникают значительные колебания от действия ветра с относительно низкими скоростями. При скорости ветра, достигающей приблизительно 14 м/с, движение по мосту перекрывают.

Наиболее сильные вертикальные колебания моста Rio-Niteroi, когда люди в панике даже бросали свои автомобили, были зафиксированы в августе 1980 года. Амплитуда колебаний составляла 60 см. Позднее частые ветра скоростью 15–16 м/с еще несколько раз становились причиной нестабильного состояния моста. Наиболее поздние колебания датируются 16 октября 1997 года и 17 февраля 1998 года.

Благодаря камере, установленной на мосту, удалось документально зафиксировать аномальные колебания моста Rio-Niteroi, которые произошли в октябре 1997 года. Наблюдаемая амплитуда колебаний в середине пролета составляла приблизительно 250 мм. Безусловно, эти события вызвали серьезные опасения и специалистов в области динамики и аэроупругости, и просто граждан в отношении целостности, пригодности к эксплуатации и безопасности моста Rio-Niteroi.

В качестве мер стабилизации состояния моста рассматривались аэродинами-

ческие обтекатели, установка которых позволила бы придать поперечному сечению пролетного строения удобообтекаемую форму, что изменило бы аэроупругие силы, действующие на него. Эффективность такого способа гашения проверялась экспериментальными исследованиями в аэродинамической трубе на секционной модели моста. Однако, как показал эксперимент, значительных изменений в поведении конструкции пролетных строений под действием ветрового потока отмечено не было.

При исследовании динамической устойчивости моста Rio-Niteroi было выяснено, что, помимо ветрового воздействия, источником колебаний центральных пролетных строений может быть также тяжелый грузовой транспорт, который вызывает такую же изгибающую форму колебаний, что и вихри ветрового потока. В связи с этим было решено, что наиболее подходящей мерой обеспечения стабилизации и безопасной эксплуатации моста Rio-Niteroi является его оснащение динамическими устройствами гашения колебаний.

На нем была установлена многоэлементная система синхронизированных динамических аттенуаторов (МСДА). Она состоит из 32 синхронизированных динамических аттенуаторов, с массой каждого 2,2 т. Суммарный вес предложенных устройств гашения колебаний составляет лишь 0,5% от общей массы стальных конструкций трех главных пролетных строений моста.

Данная система гашения колебаний размещается внутри коробчатой балки пролетных строений моста Rio-Niteroi. Каждый аттенуатор закрепляется с помощью шести цилиндрических пружин на опорную раму,



Рис. 2. Прототип синхронизированных динамических аттенуаторов, установленных на мосту Rio-Niteroi

расположенную в верхней внутренней части коробчатой балки пролетного строения (рис. 2). Сопоставление контролируемых и неконтролируемых колебаний моста указывает, что применение системы МСДА позволяет снизить их амплитуду более чем в два раза. При этом длительность процесса гашения колебаний с момента включения аттенуаторов до полного исчезновения вибрации составляет около 200 секунд.

Мост Trans-Tokyo Bay Highway (Япония). Этот многосекционный мостовой переход может также служить наглядным примером аэродинамической неустойчивости балочных неразрезных мостов. Одной из секций является десятипролетный неразрезной стальной коробчатый мост общей длиной 1630 м (рис. 3) и максимальной величиной пролета 240 м. Именно в этой секции перехода Trans-Tokyo Bay Highway наблюдались значительные колебания, вызванные действием ветра в направлении, перпендикулярном к оси моста. Максимальная амплитуда этих колебаний по первой форме достигала значения более 50 см при действии ветрового потока со скоростью около 16–17 м/с.



Рис. 3. Мост Trans-Tokyo Bay Highway

Среди мер по стабилизации состояния моста Trans-Tokyo Bay Highway, как и в случае с мостом Rio-Niteroi, рассматривались аэродинамический и динамический способ гашения колебаний. Для проверки эффективности аэродинамического способа гашения колебаний были проведены экспериментальные исследования секционной и динамически подобной модели моста в аэродинамической трубе с установкой аэродинамических обтекателей различной конфигурации. Однако полного гашения колебаний по первым двум формам достигнуто не было.

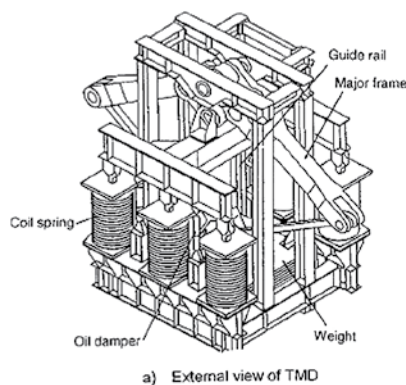


Рис. 4. Общий вид настраиваемого массового демпфера, установленного на мосту Trans-Tokyo Bay Highway

В итоге было решено установить 16 настраиваемых массовых демпферов: 8 для предотвращения колебаний по первой форме и 8 – по второй форме. Для гашения колебаний по более высоким формам (больше трех) была признана эффективность аэродинамического способа: для создания удобообтекаемой формы поперечного сечения пролетного строения было предложено установить вертикальные пластины к стойкам аварийных барьерных ограждений балки моста.

Настраиваемые массовые демпферы устанавливаются внутри коробчатой балки пролетного строения моста. Их конструкция выполнена в форме пантографа (рис. 4) с главными и второстепенными рамами. Масса смонтирована на нижнем конце главной рамы и движется вверх и вниз в случае колебаний балки пролетного строения моста. Цилиндрические пружины и вязкостные демпферы работают в качестве второстепенной рамы, также двигаясь вверх и вниз (рис. 5). Такая конструкция позволяет значительно уменьшить

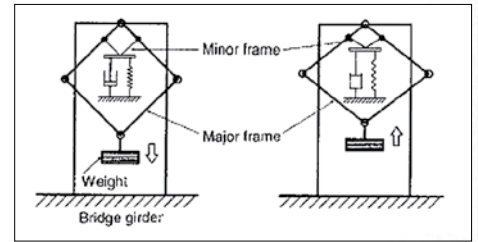


Рис. 5. Механизм работы настраиваемого массового демпфера, установленного на мосту Trans-Tokyo Bay Highway

размеры настраиваемого массового демпфера.

Для оценки эффективности использования настраиваемых массовых демпферов производилось сравнение значений амплитуд колебаний балки пролетного строения моста до и после их установки. Было выяснено, что при отсутствии настраиваемых массовых демпферов амплитуда колебаний превышает значение 40 см, а после их установки величина амплитуды колебаний становится равной 5–6 см.

Мост Kansai International Airport Access (Япония). Экспериментальные исследования секционной модели балочного неразрезного моста Kansai International Airport Access (рис. 6) подтвердили возможность возникновения аэроупругих колебаний. С целью предотвращения колебаний еще на этапе проектирования было решено установить внутри коробчатой балки пассивные динамические демпферы. Однако до их полной установки на пролетных строениях моста Kansai International Airport Access были зафиксированы интенсивные колебания при скорости ветра 20 м/с (1990 г.).



Рис. 6. Мост Kansai International Airport Access

Виадук Tozaki (Япония). Многочисленные экспериментальные исследования (1982 г.) динамически подобной модели виадука Tozaki в аэродинамической трубе также подтвердили возможность возникновения аэроупругих колебаний



Рис. 7. Вид аэродинамических обтекателей, установленных на виадуке Tozaki

на мосту. Виадук изначально проектировался с учетом аэродинамической устойчивости к ветру скоростью 50 м/с, характерной для места строительства. С этой целью на мосту были установлены аэродинамические обтекатели различной конфигурации (рис. 7).

Длина современных мостовых переходов порой достигает рекордных значений: более 35 км. В общем случае такие мостовые переходы состоят из центральной части в виде висячей или вантовой системы и сопряженных с ней «мостов-подходов», которые, как правило, устраивают в виде многопролетных балочных неразрезных систем. Именно эти «мосты-подходы» оказываются в зоне риска и могут проявить явление аэродинамической неустойчивости. Примером может служить мостовой переход Восточный мост «Большой Бельт» (рис. 8).

Восточный мост «Большой Бельт» (Дания). Сооружение включает трехпролетный висячий мост длиной 2694 м и примыкающие к нему восточный и западный «мосты-подходы» длиной 2529 м и 1567 м соответственно. Конструктивно «мосты-подходы» выполнены как балочные неразрезные мосты с пролетными строениями в виде сталь-



Рис. 8. Вид на «мост-подход» к Восточному мосту «Большой Бельт»

ной балки коробчатого трапециевидного сечения с постоянной высотой, равной 7 м. Расстояние между бетонными опорами одинаково и составляет 193 м. Эксперименты в аэродинамической трубе, как с секционной, так и с динамически подобной моделями, подтвердили, что конструкция пролетных строений «мостов-подходов» склонна к возникновению колебаний, вызванных срывом вихрей, при регулярно регистрируемой на месте строительства моста скорости ветра. Для обеспечения стабилизации и нормальной эксплуатации «мостов-подходов» были использованы настраиваемые массовые демпферы.

Мост Oshima (Япония). Аналогичная ситуация прослеживалась и на мосту Oshima (рис. 9). Центральная часть моста представляет собой вантовую систему с главным пролетом длиной 350 м и боковыми – по 160 м. К центральной части примыкают два «моста-подхода», на которых также возможно возникновение колебаний, согласно проведенным экспериментальным исследованиям в аэродинамической трубе. И в этом случае также в качестве меры по предотвращению колебаний использовались настраиваемые массовые демпферы.



Рис. 9. Мост Oshima

Мост Central Japan International Airport Access (Япония). На стадии проектирования балочного неразрезного моста Central Japan International Airport Access также были высказаны опасения о возможности возникновения на нем колебаний. В связи с этим были проведены испытания модели моста в аэродинамической трубе и разработаны меры по предотвращению возникновения колебаний, вызванных действием ветра, в виде пассивных массовых демпферов.

Волгоградский мост. Как показывает проведенный анализ литературных источников, в общем случае для пред-

отвращения колебаний и обеспечения безопасной эксплуатации мостового сооружения всегда применяют динамический способ гашения колебаний, связанный с установкой внутри коробчатой балки пролетного строения моста настраиваемых массовых демпферов. Аналогичный способ гашения колебаний был применен и к Волгоградскому мосту.

Для определения наиболее эффективного способа гашения колебаний Волгоградского моста в ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (ЦАГИ) в течение июня – августа 2010 года проводилась серия экспериментов в аэродинамической трубе с динамически подобной моделью части моста.

В результате экспериментальных исследований было сделано предположение, что наиболее эффективным способом устранения опасных колебаний первой очереди Волгоградского моста является повышение декремента колебаний пролетного строения за счет трех возможных вариантов:

- установки на трех максимальных пролетных строениях пассивных динамических поглотителей колебаний с демпферами. Каждый поглотитель устанавливается только на один демпфируемый тон;
- применения одного активного, самонастраивающегося поглотителя колебаний одновременно по нескольким тонам;
- установки гидравлических демпферов вблизи четырех опор длинных пролетов.

В качестве рабочего варианта была выбрана установка трех пассивных массовых демпферов на первые три формы колебаний. И осенью 2011 года демпферы производства компании Maurer (Германия) были смонтированы внутри коробчатой балки пролетного строения моста: два – в пролетах длиной по 155 м, и один – в пролете длиной 126 м. Вес каждого такого гасителя колебаний составляет 20,8 т.

Однако широко применяемые пассивные настраиваемые демпферы обладают существенным недостатком: такие гасители колебаний эффективны лишь при достаточно узкополосном спектре внешних динамических воздействий

со строго фиксированной частотой. Особенность их работы заключается в том, что при наличии подпружиненных грузов, настроенных на частоту собственных колебаний пролетного строения, происходит лишь обратимый обмен энергией между несколькими объектами без внесения потерь в колебания (закрытая энергетическая система) (рис. 10). Энергия, накопленная в упругих связях конструкции гасителя, периодически возвращаясь мостовому пролету, будет способствовать удлинению периода гашения колебаний, а при определенных условиях может спровоцировать и их усиление.

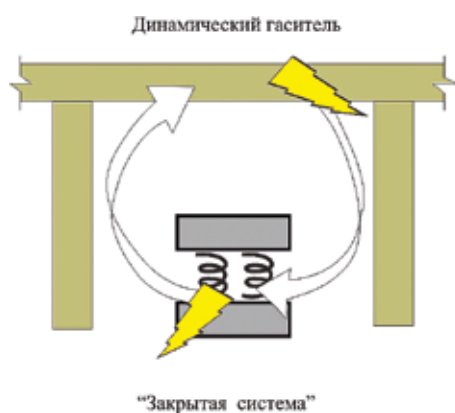


Рис. 10. Условная схема работы динамического гасителя

Кроме того, применение таких устройств в качестве гасителей колебаний приводит к изменению амплитудной характеристики конструкции, выполняя лишь смещение возможно опасного спектра колебаний. Ввиду изменчивости и случайности динамических воздействий, вероятность повторного попадания частоты внешнего воздействия в измененный спектр собственных частот колебаний конструкции остается достаточно высокой.

Приведенные примеры аэродинамической неустойчивости балочных неразрезных мостов свидетельствуют о том, что данное явление не случайно, а закономерно. Поскольку за последние десятилетия было построено множество мостов подобной конструкции, не только как отдельных систем, но и как «мостов-подходов» к висячим или вантовым мостовым сооружениям, есть реальная опасность, что в скором времени мир потрясет еще одна новость о «танцующем» мосте. Поэтому поиск мер по

осуществлению обеспечения устойчивой стабилизации и безопасной эксплуатации мостов такого типа продолжает быть актуальным.

В качестве альтернативного решения проблемы Волгоградского моста был предложен оригинальный по своему исполнению и эффективный способ гашения колебаний балочных неразрезных мостов. В его основу заложен энергетический подход, связанный с отводом и последующей диссипацией энергии колебаний мостового пролета. Такой подход реализован в конструкции гидродинамического гасителя. Работа гидродинамического гасителя колебаний построена по принципу открытой энергетической системы: полная энергия колебаний мостового пролета через устройство гидродинамического гасителя, связывающего мост с водным массивом, передается водной среде, где полностью рассеивается (рис. 11).

Разработка защищена патентом РФ на изобретение № 2475586 от 29.07.2011 и патентом РФ на полезную модель № 111146 от 02.08.2011 (Авторы: Саманов В.В., Пономаренко С.А., Намумова Г.А.). Разработанный на основе патента РФ проект гидродинамического гасителя мостовых колебаний был представлен на XV Московском международном Салоне изобретений и инновационных технологий «Архимед-2012», где был удостоен Гран-при конкурса «Инновационный потенциал молодежи-2012», а сам патент – бронзовой медали Салона.

Получила признание данная разработка и у зарубежных специалистов в области инженерного проектирования.

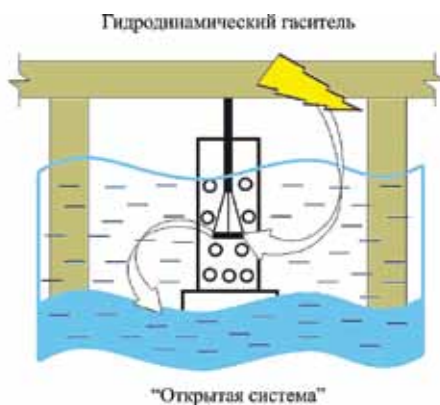


Рис. 11. Условная схема работы гидродинамического гасителя

По итогам национального отборочного тура международной премии в области промышленного дизайна и инженерного проектирования James Dyson Award 2012 (Великобритания) проект был признан победителем национального этапа, полуфиналистом международного этапа конкурса и одним из лучших проектов, по мнению инженеров компании Dyson.

Принцип работы гидродинамического гасителя колебаний (рис. 12) реализуется следующим образом: при колебаниях движение мостового пролета передается на плиту поршня гасителя через трубчатый тяговый элемент – стойку гасителя, связанную с плитой через шарнир посредством металлических тяг. Плита, повторяя гармонические колебания мостового пролета, передает энергию колебательного движения водной среде, где и происходит ее полное рассеивание.

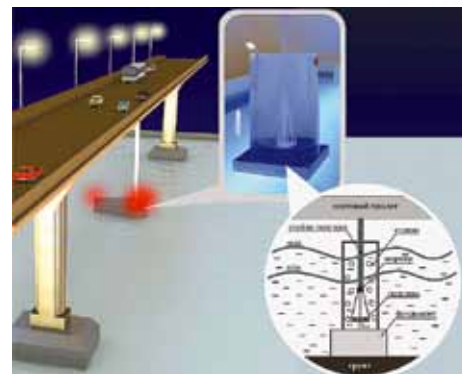


Рис. 12. Гидродинамический гаситель колебаний

Конструкция гидродинамического гасителя разрабатывалась применительно к первой очереди моста через Волгу в Волгограде, на которой были зафиксированы колебания. Принципиальным моментом при разработке технологической части конструкции гидродинамического гасителя является определение площади плиты поршня гасителя, которая необходима для полного гашения колебаний пролетных строений балочного неразрезного моста.

Для определения площади плиты поршня была использована величина мощности накачки (N_m), определенная исходя из значения кинетической энергии трех основных пролетов Волгоградского моста с длиной $l = 155$ м, на которых фиксировалась максимальная амплитуда, а также среднее значение удельной мощности водного потока ($N_{ср.в.}$), в виде

столба жидкости вокруг плиты поршня гасителя, повторяющего гармонические колебания мостового пролета.

Сопоставление этих значений с учетом коэффициента гидродинамического сопротивления (k_{ϕ}), позволило определить примерное значение площади плиты поршня гасителя:

$$S_{\Delta} = k_{\phi} \cdot N_m / N_{\text{ср.у. в.}}$$

По предварительным расчетам, для гашения колебаний пролетов Волгоградского моста достаточно единичного демпфера с рабочей площадью плиты поршня гасителя $S_{\Delta} = 4,7 \text{ м}^2$, что составляет ничтожную долю от размеров всего моста.

Более подробное описание расчета необходимой площади плиты поршня гидродинамического гасителя отражено в работе: «Гидродинамический способ гашения колебаний мостовых пролетов» / Г.А. Наумова, С.А. Пономаренко // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – № 6(35). – С. 51–59.

Помимо высокой технической эффективности в решении проблемы аэродинамической неустойчивости балочных неразрезных мостов, проект гидродинамического гасителя демонстрирует высокий коэффициент ожидаемой экономической эффективности. Использование в качестве среды, поглощающей энергию колебаний, естественного водного массива позволяет существенно сократить затраты по обеспечению безопасной эксплуатации моста.

Оценка экономической эффективности проекта гидродинамического

гасителя была произведена в сопоставлении с реально выполненным проектом установки динамических гасителей на мосту через Волгу в Волгограде. Для оценки экономической эффективности каждого из проектов были соотнесены их фактические и плановые сметные стоимости (рис. 13) и определен условный коэффициент экономической эффективности динамического (K_p) и гидродинамического (K_b) гасителя.

Согласно опубликованным данным, средняя стоимость систем гашения колебаний мостовых пролетов на мировом рынке установилась примерно на уровне 200 млн рублей. Плановая сметная стоимость динамических гасителей, установленных на мосту через Волгу в Волгограде, составила 120,5 млн рублей.

Плановая сметная стоимость конструкции гидродинамического гасителя с защитным устройством (стаканом), по предварительным оценочным расчетам, установилась на уровне 10 млн рублей, что было определено на основании сметных расчетов, выполненных с использованием нормативных документов: «Территориальные единичные расценки для определения стоимости строительства в Волгоградской области ТЕР-2001», Ежеквартальный бюллетень ГАУ ВО «Региональный Центр по ценообразованию в строительстве Волгоградской области», «Сборник текущих средних сметных цен на материалы».

В итоге условный коэффициент экономической эффективности для проекта динамического гасителя составил:

$$K_p = C_{\phi} / C_n = 1,66,$$

где

C_{ϕ} – фактическая стоимость;

C_n – плановая стоимость.

Аналогично, условный коэффициент экономической эффективности проекта гидродинамического гасителя определен величиной $K_b = 20$.

Коэффициент экономической эффективности проекта гидродинамического гасителя оценивался соотношением:

$$f_{\text{эф}} = (K_b / K_p) \cdot 100\% = (20/1,66) \cdot 100\% = 1205\%,$$

где

$f_{\text{эф}}$ – эффективность проекта гидродинамического гасителя;

K_b – условный коэффициент эффективности проекта гидродинамического гасителя;

K_p – условный коэффициент эффективности проекта динамического гасителя.

Полученное даже по первым предварительным расчетам значение коэффициента $f_{\text{эф}} = 1205\%$ говорит о высочайшем уровне экономической эффективности и перспективности проекта.

В процессе анализа экономической эффективности проекта гидродинамического гасителя была подсчитана внутренняя норма доходности проекта, что составило: $IRR = 47,9\%$.

Высокое значение показателя внутренней нормы доходности свидетельствует об инвестиционной привлекательности и прибыльности проекта. Демонстрируя как техническую, так и экономическую эффективность в решении проблемы стабилизации состояния балочных неразрезных мостов, проект гидродинамического гасителя может составить уверенную конкуренцию уже существующим традиционным способам гашения мостовых колебаний.

Г. А. Наумова,

д-р техн. наук, проф.,

С.А. Пономаренко,

аспирант,

Волгоградский

государственный университет

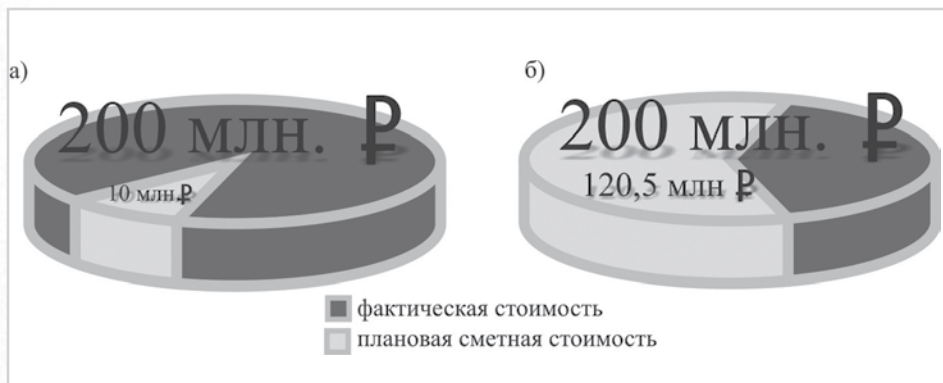


Рис. 13. Соотношение фактической и плановой сметной стоимости проектов гашения колебаний моста через р. Волгу в Волгограде: а) гидродинамический гаситель (виртуальный проект); б) динамические гасители (реализованный проект)