



УДК 624.21/.8  
ББК 39.112

## ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ГАСИТЕЛЬ МОСТОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

*Г.А. Наумова, В.В. Саманов, С.А. Пономаренко*

В статье предлагается эффективное решение проблемы стабилизации и безопасной эксплуатации балочных неразрезных мостов. В основу этого решения положен энергетический подход к гашению колебаний, построенный на принципе диссипации энергии колебаний посредством гидродинамического гасителя. Представлена принципиальная схема гасителя. Приведен анализ экономической эффективности проекта.

**Ключевые слова:** *аэродинамическая неустойчивость, частота собственных колебаний, спектр частоты колебаний, балочный неразрезной мост, диссипация энергии, гидродинамический гаситель, безопасная эксплуатация мостов.*

Общее направление современного этапа развития мостостроения, связанное с «эскалацией размеров и идей», оказало пагубное влияние на конструкции балочных неразрезных мостовых переходов. Пролетные строения мостов такого типа «совершенно неожиданно» для мостостроителей стали гибкими и весьма чувствительными к ветровому воздействию. В результате инженеры вновь столкнулись со старой проблемой, но уже в новой постановке: все громко заговорили о наличии аэродинамической неустойчивости **балочных неразрезных мостов**. Недавний инцидент, произошедший с мостом через р. Волгу в Волгограде, – прямое тому подтверждение

Явление аэродинамической неустойчивости балочных неразрезных мостов воспринимается инженерным сообществом как чрезвычайная ситуация, которая может привести к полному или частичному разрушению моста.

Документально зафиксированы с 1974 по 2002 г. мощные колебания центральной части балочного моста *Rio-Niteroi* (Бразилия). При скорости ветра 15–16,5 м/с амплитуда колебаний мостовых пролетов достигала величины от 25 до 60 см [7].

На стадии проектирования и строительства виадука *Tozaki* (Япония) в 1982 г. – балочного моста, состоящего из трехпролетной неразрезной балки коробчатого сечения (108 м + 108 м + 108 м) и четырехпролетной неразрезной балки коробчатого сечения (149,6 м + 190,4 м + 190,4 м + 149,6 м), – была выявлена возможность возникновения галопирования и колебаний, вызванных вихрями Кармана. Мост проектировался с учетом аэродинамической устойчивости к ветру скоростью 50 м/с, характерной для места строительства [10].

При строительстве балочного неразрезного моста *Trans Tokyo Bay Highway* (Япония) через Токийский залив были зафиксированы значительные колебания его пролетных строений с амплитудой более 50 см при действии ветрового потока со скоростью 16 м/с (1995 г.) [9].

Во время испытаний в аэродинамической трубе модели эстакады к международному аэропорту «Кансай» (Япония) в 1990–1991 гг. была выявлена возможность возникновения галопирования и вихревых колебаний при скорости ветра от 20 до 60 м/с [6].

20 мая 2010 г. на мосту через р. Волгу в Волгограде были зафиксированы значительные колебания при действии ветра скоростью 13 м/с (данные метеосводки) [1].

Если принять во внимание тот факт, что расчет и проектирование вышеупомянутых «танцующих» мостов производился в проект-

ных организациях разных стран, то можно сделать неутешительный вывод, что колебания балочных неразрезных мостов – результат серьезных просчетов в теории.

В связи с тем что за последние десятилетия строительство балочных неразрезных мостов получило широкое распространение по всему миру, возникает необходимость в проверке всех уже построенных мостов такого типа с выявлением среди них группы потенциально опасных, на которых возможно возникновение колебаний. Для этой группы риска в срочном порядке необходимо принять меры по обеспечению их стабилизации и безопасной эксплуатации.

Обозначенную проблему на современном этапе пытаются решать общеизвестным подходом – изменением частоты собственных колебаний сооружения посредством внесения в него конструктивных изменений, увеличивающих декремент колебаний до уровня, гарантирующего безопасную эксплуатацию данного сооружения. На этом принципе основаны аэродинамический и динамический способы гашения мостовых колебаний, а также способ устройства легковесных резонаторов [8].

Необходимо отметить, что широко используемые в мостостроительной практике динамические 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). Энергия, накопленная в упругих связях конструкции гасителя, периодически возвращаясь к мостовому пролету, будет способствовать удлинению периода гашения колебаний, а при определенных условиях может спровоцировать их усиление.

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.

Не менее широко известен и другой способ стабилизации состояния конструкции при колебаниях: для восстановления ее равновесного состояния покоя необходимо обеспечить отвод и диссипацию накопленной энергии колебательного движения.

Однако в мостостроении такой подход ранее не применялся. Но именно он может рассматриваться как наиболее рациональное решение проблемы аэродинамической неустойчивости уже построенных или только возводимых балочных неразрезных мостов. Идея такого подхода реализована в конструкции гидродинамического гасителя колебаний патентом РФ [5].

Принцип работы динамического и гидродинамического гасителей колебаний представлен на условных схемах (рис. 1).

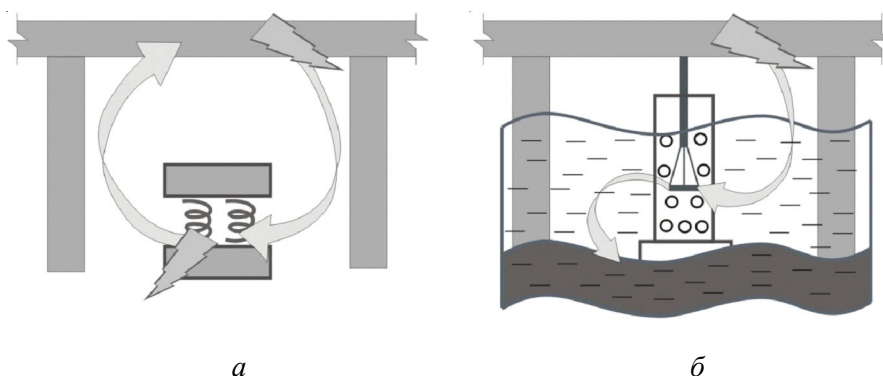


Рис. 1. Условные схемы работы гасителей:

*а* – динамический гаситель («закрытая система»); *б* – гидродинамический гаситель («открытая система»)

Идея, на которой построен принцип действия устройства гидродинамического гасителя колебаний мостовых пролетов, предельно проста и заключается в построении открытой энергетической системы, в которой накопленная энергия колебаний мостового полотна через гаситель передается естественному поглотителю энергии – водной среде, где и происходит ее полная диссипация.

Конструктивная особенность неразрезных балочных мостов позволяет сделать предположение, что для обеспечения полного гашения колебаний можно обойтись установкой на весь мост всего одного гасителя в несудоходном пролете, как для случая моста через р. Волгу в Волгограде. По предварительным расчетам для гашения колебаний его пролетных строений достаточно единичного демпфера с рабочей площадью плиты поршня гасителя  $S_p = 4,7 \text{ м}^2$  и диаметром  $d = 2,45 \text{ м}$ , что составляет ничтожную долю от размеров всего моста.

В данном конкретном случае при наличии течения конструкция гидродинамического гасителя будет состоять из двух принципиальных частей: гасителя-поршня и стакана (рис. 2). Гаситель-поршень (рис. 2, 1–4) – рабочая часть конструкции гидродинамического гасителя; стакан (рис. 2, 5, 6) – его защитная часть.

Гаситель-поршень представляет собой железобетонную плиту круглой формы, при-

крепленную посредством вантовых тяг через шарнир к трубчатому тяговому элементу. В верхней части трубчатый тяговый элемент жестко закреплен в середине одного из несудоходных пролетов моста. Соединение вантовых тяг с трубчатым тяговым элементом через шарнир обусловлено возможностью возникновения поперечных колебаний мостового пролета. Наличие шарнира исключает возможность крена плиты гасителя-поршня во время таких колебаний и обеспечивает ее вертикальное перемещение. Плита гасителя-поршня располагается ниже минимально возможного уровня воды.

Вторая часть конструкции гидродинамического гасителя представляет собой железобетонный стакан, имеющий «каплевидную» форму сечения. Радиус широкой части «каплевидной» формы сечения стакана, в которую вписана круглая плита гасителя-поршня, превышает ее радиус на расчетную величину, определяемую вероятным отклонением от вертикали трубчатого тягового элемента в случае возникновения крутильных колебаний в полотне моста, обеспечивая, таким образом, свободное вертикальное перемещение плиты гасителя-поршня в теле стакана. Верх стакана размещается в толще водного массива выше максимально возможного уровня воды, а низ опирается на фундамент. Положение дна стакана должно обеспечивать размещение плиты гасителя-поршня ниже минимального уровня воды.

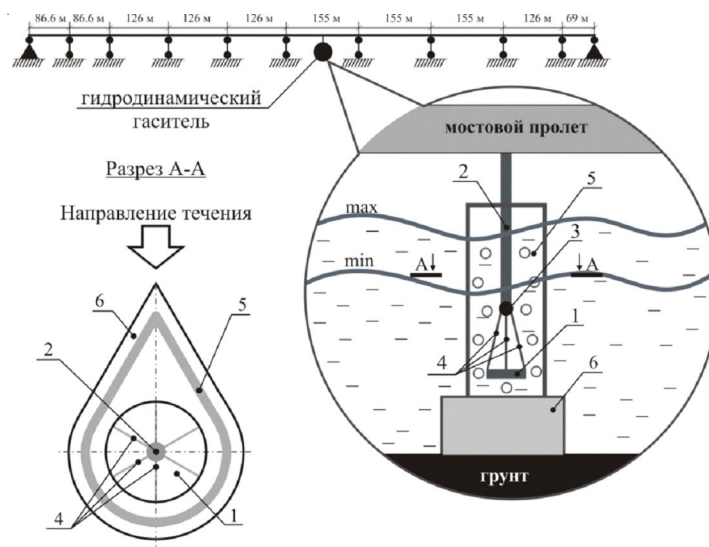


Рис. 2. Условная схема моста через р. Волгу в Волгограде с устройством гидродинамического гасителя:

- 1 – плита гасителя-поршня; 2 – трубчатый тяговый элемент гасителя-поршня;
- 3 – шарнир; 4 – вантовые тяги; 5 – стакан; 6 – фундамент стакана

Стакан служит защитой поршневой части конструкции гасителя от течения воды, ледохода, случайного навала водного транспорта и мусора. Острие «каплевидной» формы сечения стакана направлено в сторону против течения реки. В случае наличия под мостовым пролетом водоема без течения защитная часть конструкции гасителя (стакан) может быть полностью исключена.

Конструктивные особенности гидродинамического гасителя и принцип его работы позволяют сделать обоснованное предположение о его высокой экономической эффективности.

Оценка экономической эффективности проекта гидродинамического гасителя была произведена в сопоставлении с реально выполненным проектом установки динамических гасителей на мосту через р. Волгу в Волгограде.

Для оценки экономической эффективности каждого из проектов были соотнесены их фактические и плановые сметные стоимости (рис. 3) и определен условный коэффициент экономической эффективности динамического ( $K_p$ ) и гидродинамического ( $K_g$ ) гасителей.

Согласно опубликованным данным, средняя стоимость систем гашения колебаний мостовых пролетов на мировом рынке установилась примерно на уровне 200 млн рублей [2].

Плановая сметная стоимость динамических гасителей, установленных на мосту через р. Волгу в Волгограде, составила 120,5 млн рублей [4].

Плановая сметная стоимость конструкции гидродинамического гасителя с защитным устройством (стаканом) по предварительным оценочным расчетам установилась на уровне 10,0 млн руб., 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  $C_\phi$  – фактическая стоимость;

$C_n$  – плановая стоимость.

Аналогично условный коэффициент экономической эффективности проекта гидродинамического гасителя определился величиной  $K_g = 20$ .

Коэффициент экономической эффективности проекта гидродинамического гасителя оценивался соотношением:

$$f_{эф} = (K_g / K_p) \cdot 100 \% = (20 / 1,66) \cdot 100 \% = 1\,205 \%,$$

где  $f_{эф}$  – эффективность проекта гидродинамического гасителя;

$K_g$  – условный коэффициент эффективности проекта гидродинамического гасителя;

$K_p$  – условный коэффициент эффективности проекта динамического гасителя.

Полученное, даже по первым предварительным расчетам, значение коэффициента  $f_{эф} = 1\,205 \%$  говорит о высочайшем уровне экономической эффективности и перспективности проекта.



Рис. 3. 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)

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

Высокое значение данного показателя свидетельствует об инвестиционной привлекательности и возможной прибыльности проекта.

Построенный на принципе диссипации энергии гидродинамический гаситель колебаний может в перспективе демонстрировать следующие качества:

- быстрое и эффективное гашение колебаний вне зависимости от типа и вида динамического воздействия;
- обеспечение устойчивости многопролетной конструкции установкой только одного гасителя;
- простота конструктивной схемы;
- незначительная нагрузка от собственного веса гасителя;
- малые габариты гасителя, не нарушающие архитектурно-эстетический облик мостового перехода;
- высокая инвестиционная привлекательность и экономическая целесообразность.

Разработка защищена патентом РФ на полезную модель № 111146 «Устройство гидродинамического гасителя колебаний мостового пролета» (авторы: В.В. Саманов, С.А. Пономаренко, Г.А. Наумова), который был отмечен бронзовой медалью и дипломом 15-го Московского Международного Салона изобретений и инновационных технологий «Архимед-2012». Разработанный по теме патента проект «Новый способ гашения колебаний на неразрезных балочных мостах при строительстве и эксплуатации» (авторы: С.А. Пономаренко, Я.А. Борисанова; научный руководитель: д-р техн. наук, проф. Г.А. Наумова) был удостоен Гран-при конкурса «Инновационный потенциал молодежи – 2012» Салона «Архимед» [3]. Данная разработка была также отмечена на Международном конкурсе в сфере промышленного дизайна и инженерного проектирования «*James Dyson Award 2012*» (Великобритания), где по итогам национального отборочного тура заняла второе место и вошла в число 50 лучших проектов, отобранных инженерами компании *Dyson*.

Разработка может представлять интерес для зарубежных компаний, занимающихся

производством гасителей колебаний, среди них такие компании, как *Maurer* и *Gerb* – явные лидеры зарубежного рынка. На отечественном рынке, не имеющем специализированных предприятий по производству гасителей, заинтересованность может проявить любая мостостроительная компания.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архив погоды в Волгограде. 20 мая 2010 г. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://volgogradmeteo.ru/archive.php> (дата обращения: 30.07.2012). – Загл. с экрана.
2. Замминистра транспорта РФ посетил Волгоград / А. Кузнецова. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://v1.ru/newslines/359326.html> (дата обращения: 20.11.2012). – Загл. с экрана.
3. Итоги XV Московского Международного Салона изобретений и инновационных технологий «Архимед» – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://www.archimedes.ru/news.php?Y=12&M=03&D=27&LC=1> (дата обращения: 30.06.2012). – Загл. с экрана.
4. Разработка проектной документации на капитальный ремонт первого пускового комплекса первой очереди мостового перехода через р. Волга в г. Волгограде. – М. : Гипротрансмост, 2011. – 688 с.
5. Устройство гидродинамического гасителя колебаний мостового пролета : п.м. 111146 Рос. Федерация : МПК E01D 19/02 / В. В. Саманов, С. А. Пономаренко, Г. А. Наумова ; заявитель и патентообладатель Г. А. Наумова. – № 2011132505/03 ; заявл. 02.08.11 ; опубл. 10.12.12, Бюл. № 34. – 3 с.
6. Aerodynamic stability of Kansai international airport access bridge / A. Honda [et al.] // Journal of wind engineering and industrial aerodynamics. – 1993. – Vol. 49. – P. 533–542.
7. Battista, R. C. Multiple Synchronized Dynamic Attenuators of Wind-induced Oscillations of Rio-Niteroi Bridge. – Electronic text data. – Mode of access: <http://sem-proceedings.com/23i/sem.org-IMAC-XXIII-Conf-s08p02-Multiple-Synchronized-Dynamic-Attenuators-Wind-induced-Oscillations.pdf> (date of access: 30.01.2011). – Title from screen.
8. Brun, M. Periodically fighting shake, rattle and roll / M. Brun, A. B. Movchan, I. S. Jones. – Electronic text data. – Mode of access: <http://arxiv.org/pdf/1107.1788.pdf> (date of access: 01.02.2012). – Title from screen.
9. Control, simulation and monitoring of bridge vibration – Japan's recent development and practice

/ Y. Fujino [et al.]. – Electronic text data. – Mode of access: <http://www.iabse-bd.org/old/fl.pdf>. – Title from screen.

10. Kusuhara, S. Reevaluation on aerodynamic stability of steel box girder / S. Kusuhara, I. Yamada,

N. Toyama // The Seventh Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, Nov. 8–12, 2009, Taipei, Taiwan. – Electronic text data. – Mode of access: [http://www.iawe.org/Proceedings/7APCWE/T3A\\_1.pdf](http://www.iawe.org/Proceedings/7APCWE/T3A_1.pdf). – Title from screen.

## **THE HYDRODYNAMIC DAMPER OF BRIDGE OSCILLATIONS**

*G.A. Naumova, V.V. Samanov, S.A. Ponomarenko*

This article presents an efficient way of damping bridge spans oscillations of continuous girder bridges. The basis for this decision is energy approach to damping oscillations built on the principle energy dissipation using hydrodynamic damper of oscillations. Structural scheme of damper is presented. Cost-effectiveness analysis of the project was carried out.

**Key words:** *aerodynamic instability, eigenfrequency, frequency spectrum of oscillations, continuous girder bridge, energy dissipation, hydrodynamic damper, bridges safety operation.*