

УДК 624.046.3

С.Д. Саленко, А.Д. Обуховский, Ю.В. Телкова

ПАССИВНЫЕ ГАСИТЕЛИ АЭРОУПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ ПРОЛЕТНОГО СТРОЕНИЯ МОСТА НА СТАДИИ МОНТАЖА

Проведены исследования аэроупругих колебаний модели пролетного строения балочного моста под воздействием ветра на стадии монтажа. Модель исходного варианта пролетного строения была подвержена возбуждению интенсивных колебаний двух типов: ветровой резонанс и галопирование. Предложены пассивные аэродинамические гасители колебаний, геометрические параметры которых были оптимизированы по методу градиентного спуска. Расчеты показали, что применение устройств гашения на натурном пролетном строении на всех стадиях надвигки приведет к уменьшению амплитуды изгибных колебаний до величин не более 0,1 м в диапазоне скоростей ветра до 25 м/с.

К л ю ч е в ы е с л о в а: балочный мост; устройства гашения колебаний; ветровой резонанс; галопирование.

The research of aeroelastic vibrations of the deck stringer bridge models by the wind at the stage of the mounting is performed. The model of the original version of the bridge superstructure was subjected to violent vibrations of two types: wind resonance and galloping. Passive aerodynamic oscillation dampers, geometrics were optimized according to the method of the gradient descent, are offered. Calculations are showed that the use of suppressors to the full-scale deck at all stages of sliding is lead to the dim spot of the bending vibrations to the value not exceeding 0.1 m in the range of wind speeds up to 25 m/sec.

К е y w o r d s: stringer bridge; suppressor of vibrations; wind resonance, galloping.

Катастрофа, произошедшая в США в 1940 г. с висячим мостом Такома-Нерроуз, положила начало новому направлению динамики сооружений — аэродинамике мостов [1]. До этого случая первостепенным считалось обеспечение статической прочности, при этом аэродинамическая устойчивость мостовых конструкций обеспечивалась совершенно случайно. Однако эта катастрофа подтолкнула к систематическому изучению ветровых воздействий на большепролетные мосты, и все чаще стали прибегать к испытаниям моделей мостов в аэродинамических трубах. В настоящее время в индустриально-развитых странах все уникальные инженерные сооружения проходят обязательную комплексную аэродинамическую экспертизу в специализированных научно-исследовательских центрах [2, 3]. В нашей стране и в странах ближнего зарубежья также накоплен значительный опыт проектирования большепролетных висячих, вантовых мостов и трубопроводов [4, 5]. Вопросами аэроупругих характеристик конструкций балочных мостов с 1990 г. занимаются на кафедре аэрогидродинамики Новосибирского государственного технического университета (НГТУ). Первыми были исследованы колебания надвигаемого пролетного строения балочного моста через р. Обь в г. Барнауле, амплитуда которых достигала примерно 1 м при скорости ветра 13...14 м/с. На кафедре аэрогидродинамики в сжатые сроки были разработаны устройства для аэродинамического гашения колебаний, внедрение которых показало высокую эффективность. Также были проведены подобные работы на стадии разработки конструкций мостов через р. Томь в г. Томске (1996 г.), через р. Иртыш в г. Омске (2001 г.) и через р. Томь в г. Кемерово (2004 г.) [6,

7]. В настоящее время существует достаточно примеров неблагоприятного воздействия ветровых нагрузок на мостовые конструкции. К примеру, в декабре 2006 г. произошло обрушение строящегося моста через р. Западная Двина на юго-западном обходе Витебска [8]. Строительство производилось по технологии продольной надвигки, когда металлические конструкции собираются на берегу, а затем надвигаются на бетонные опоры. Во время надвигки под действием ветра развились колебания, которые привели к катастрофе. В мае 2010 г. в Волгограде произошел инцидент с «танцующим» мостом через р. Волгу: при скорости ветра 16 м/с возникли волнообразные колебания пролетов моста, размах которых достиг почти одного метра. С учетом вышеизложенного гашение колебаний конструкций мостов представляет важную инженерную проблему.

Объектом представляемых исследований являются колебания в ветровом потоке пролетного строения моста через р. Обь у пос. Красный Яр на стадии монтажа методом продольной надвигки. Заказчиками данной работы являлись Новосибирский филиал ОАО «Институт Гипростроймост» и ОАО «СИБМОСТ». Пролетное строение первой очереди моста имело максимальный пролет 147 м и представляло собой коробчатую главную балку шириной 5,404 м, высотой 3,63 м, покрытую сверху ортотропными плитами. Для облегчения и уменьшения статического прогиба с авангардной части были сняты консольные ортотропные плиты на участке 42,4 м, а на конце установлен аванбек длиной 42 м.

Целью представленной работы — определение характера возникающих аэроупругих колебаний исходного варианта пролетного строения и разработка устройств для их гашения.

Методика экспериментов. Наиболее достоверную информацию о процессе колебаний пролетного строения моста дают продувки в аэродинамической трубе динамически подобной модели. В то же время много полезной информации о процессе может дать рассмотрение упрощенной схемы — так называемой «секционной» модели. Для экспериментальных исследований были разработаны и изготовлены в масштабе 1:50 секционные модели двух типов: модель участка авангардной части главной балки без консольных ортотропных плит и модель участка с плитами (рис. 1). Для приближения к двумерному характеру обтекания на торцах моделей параллельно направлению набегающего потока крепились концевые шайбы.

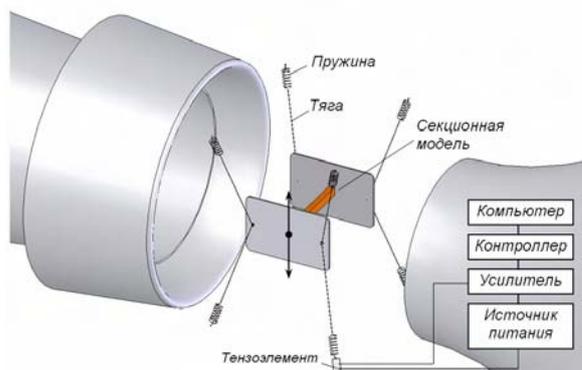


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Динамически подобная модель, выполненная в масштабе 1:100, представляла собой копию консольной части натурной конструкции. Для обеспечения динамического подобия по массе и жесткости, основные элементы модели, находящиеся в потоке, формовались из композиционного материала на основе углеткани и стеклоткани с эпоксидным связующим. Для рассматриваемого типа мостов, в отличие от природы, обычно не выполняется многопролетная модель пролетного строения, а моделируется только авангардная (консольная) часть строения. Сравнение относительных амплитуд колебаний модели и натурального пролетного строения моста через р. Обь в г. Барнауле [6] показало, что применяемая методика моделирования обеспечивает хорошее соответствие модельных и натуральных результатов.

Исследования проводились в лаборатории промышленной аэродинамики НГТУ на дозвуковой аэродинамической трубе Т-503 замкнутого типа с открытой рабочей частью; длина рабочей части — 2 м, диаметр — 1,2 м. Рабочий диапазон скоростей — 0...60 м/с. Для имитации земной поверхности в рабочей части аэродинамической трубы устанавливался экран, а на срезе сопла для моделирования приземного слоя атмосферы — решетка с переменным по высоте шагом [9]. Степень турбулентности без турбулизирующей решетки была около 0,5, а с решеткой — 5...8 %.

Результаты исследований и их анализ. Исследования проводились при числах Рейнольдса, рассчитанных по высоте главной балки, $Re = 0,1...1,3 \times 10^5$. Как показали предварительные эксперименты с секционной и динамически подобной моделями, исследуемое пролетное строение на стадии монтажа подвержено интенсивным колебаниям двух типов: ветровой резонанс и галопирование. Исследования по оценке влияния вылета консоли и угла скольжения на интенсивность аэроупругих колебаний модели показали, что наиболее опасный является средний вылет, соответствующий $L_k = 108$ м на натуре, а опасным направлением потока — близкие к нулевым углы скольжения $\beta = 0...-10^\circ$.

Результаты продувок показали, что если не принимать специальных мер, то следует ожидать возбуждения аэроупругих колебаний пролетного строения с амплитудой более 0,5...1,0 м начиная со скоростей 11...12 м/с.

Основной причиной аэроупругих колебаний пролетного строения моста является регулярный периодический сход двумерной вихревой пелены с поверхности плохообтекаемой балки, поэтому принципом их аэродинамического гашения является создание такой структуры потока, при которой будет размыт четкий пик на спектрах пульсаций скорости и давления в окрестности тела, ослаблена корреляция пульсаций аэродинамической силы по длине строения и утрачена возможность многовариантности структур течения.

Устройства для гашения колебаний должны удовлетворять следующим требованиям:

- высокая эффективность во всем диапазоне скоростей ветра;
- сохранение виброгасящих свойств при любых направлениях ветра;
- незначительное увеличение лобового сопротивления конструкции для исключения возникновения колебаний в горизонтальной плоскости;
- отсутствие статической составляющей подъемной силы при нулевом угле атаки для исключения вертикальных колебаний конструкции от горизонтальных порывов;

минимально возможные габариты и вес устройств, так как значительное утяжеление пролетного строения недопустимо из-за опасности статической перегрузки сооружения;

сами устройства не должны являться источниками опасных пульсаций давления;

устройства не должны затруднять процесс монтажа (необходимо учитывать, что монтаж пролетного строения моста ведется методом продольной надвигки, и нижние поверхности балок движутся по путям качения);

желательно, чтобы шаг размещения устройств по длине строения был согласован с шагом силовых элементов для унификации узлов крепления; обеспечение технологичности при изготовлении и монтаже устройств.

Оптимизация геометрических параметров аэродинамических гасителей колебаний расчетными методами на сегодняшний день наталкивается на значительные трудности, поэтому основным способом решения данной задачи следует считать продувки моделей в аэродинамической трубе. Эксперименты по оптимизации параметров гасителей колебаний заключаются в исследовании нескольких типов устройств, для каждого из которых оптимизируется множество геометрических параметров. Для этого обычно используется метод градиентного или координатного спуска для многомерной зависимости амплитуды колебаний от параметров гасителей.

Предварительная оценка эффективности устройств для гашения колебаний была проведена на упруго подвешенной секционной модели. В первом приближении рассматривались устройства двух типов (рис. 2), для каждого из которых варьировались вылет h и шаг между устройствами b .

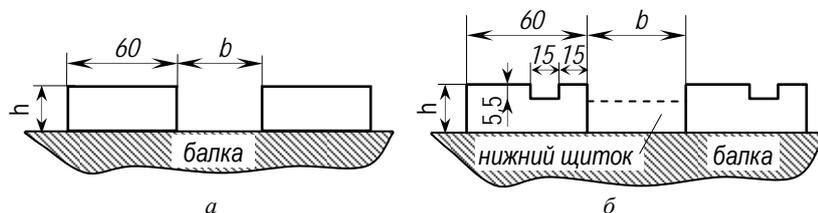


Рис. 2. Форма и расположение устройств для гашения колебаний секционной модели: a — устройства I; b — устройства II

Устройства I и II типов устанавливались горизонтально на верхней поверхности балки и представляли собой простой прямоугольный щиток и прямоугольный щиток с несимметричной выемкой соответственно. Варианты щитков с изломами кромок рассматривались для уменьшения синхронности схода вихревой пелены с самих устройств. В некоторых случаях в промежутках между верхними устройствами II на боковых стенках балки устанавливались дополнительные прямоугольные щитки вблизи от нижнего угла. Это было сделано в связи с конструктивно-технологическими особенностями процесса надвигки исследуемого пролетного строения. По результатам экспериментов по оптимизации вылета допустимое снижение галопирующих колебаний обеспечивается только устройствами I при их больших вылетах $h = 7...30$ мм на модели. Относительная амплитуда колебаний при этом не превышала величины 0,02. Поиски оптимального шага между устройствами I и II привели к следующим результатам: при изменении величины относи-

тельного шага b/B ($B = 60$ мм — ширина щитка) в диапазоне от 1,3...3 колебания практически не гасятся. Достаточно высокую эффективность дает лишь шаг $b/B = 1$.

В дальнейших экспериментах поиски оптимального варианта гасителя свелись к рассмотрению совместно с устройствами I и II еще четырех модификаций щитков (III, IV, V и VI) с одинаковыми вылетами $h = 32$ мм и шагом $b/B = 1$, с целью оценки влияния формы устройств на амплитуды колебаний при условии их одинаковой площади. В результате, для последующих исследований в качестве исходного был отобран лучший вариант гасителя — устройство V, уменьшающее амплитуды колебаний в 6...10 раз (рис. 3).

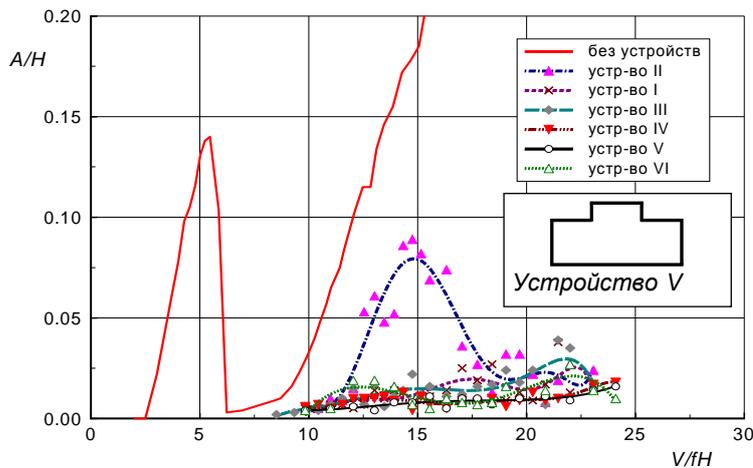


Рис. 3. Влияние формы устройств на эффективность гашения колебаний

Дальнейшая оптимизация геометрических параметров устройств V типа была продолжена на динамически подобной модели. Поскольку самой опасной стадией надвигки является монтаж при вылете пролетного строения близком к максимальному, и при околонулевом угле скольжения, то вначале оптимизация проводилась именно для этой стадии.

На первом этапе оптимизации исследовались 6 вариантов устройств, имеющих фиксированную ширину B и длину выступов h_3 и отличающихся друг от друга только относительной шириной выступа B_3/B (рис. 4). Значение относительного шага всех щитков b/B выбиралось согласно результатам, полученным на секционной модели, и равнялось 1.

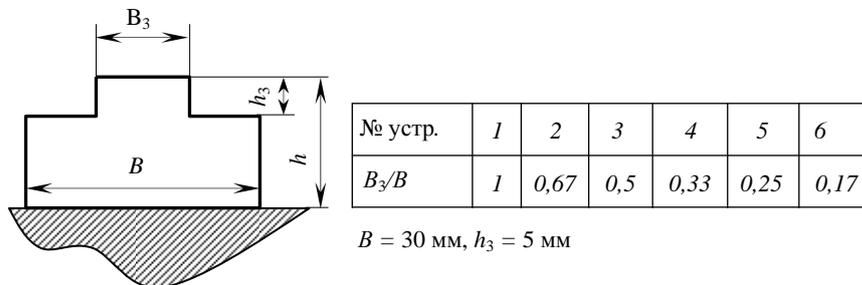


Рис. 4. Геометрические параметры устройств для гашения колебаний динамически подобной модели

Для каждого варианта щитков варьировался вылет щитка h с целью определения его влияния на эффективность гашения колебаний. Как показали результаты экспериментов, влияние величины вылетов на степень гашения колебаний для устройств 1 и 2 не наблюдалось. Изменяя длину вылетов устройств 3, 5 и 6, получили, что из всех рассмотренных вариантов удовлетворительные результаты показали устройства 3 с $h = 20$ мм и 5 и 6 с $h = 16$ мм. Однако по эффективности они уступали устройству 4 с вылетом 16 мм, так как уменьшали амплитуды колебаний не во всем диапазоне скоростей. Щиток 4 с вылетом $h = 16$ мм гасил колебания во всем исследованном диапазоне скоростей, причем при скорости $V/fH = 14...21$ он даже превосходил щитки с большим вылетом (рис. 5).

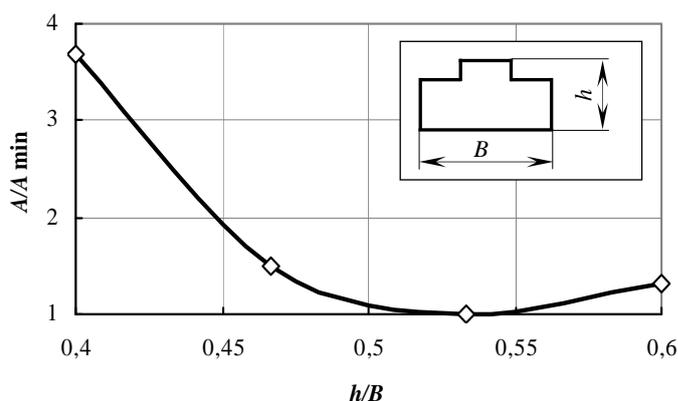


Рис. 5. Результаты оптимизации вылета для устройства 4

Следующий шаг оптимизации отражал вариации длины выступа h_3 на устройстве № 4, имеющем вылет 16 мм. Из трех рассмотренных вариантов ($h_3 = 3, 5$ и 10 мм) был выбран выступ, длиной 3 мм, как самый оптимальный.

На последнем этапе проводилась окончательная оптимизация по вылету щитка 4 с $h_3 = 3$ мм. Из рассмотренных вариантов вылетов ($h = 12, 14$ или 16 мм) одинаково высокую эффективность показали щитки с вылетами 14 и 16 мм. Щиток 4 с вылетом 14 мм более предпочтителен, так как обладает меньшей площадью поверхности. Однако в условиях турбулентного потока за решеткой последний вариант щитка недостаточно снижал амплитуды колебаний в диапазоне приведенных скоростей $V/fH = 12...16$, в результате вылет был увеличен до значения $h = 15$ мм.

Окончательный вариант устройств был экспериментально проверен при всех возможных комбинациях вылетов пролетного строения, углов скольжения и степени турбулентности. Результаты продувок динамически подобной модели показали достаточно высокую эффективность гашения колебаний во всех случаях — относительная амплитуда колебаний не превышает $0,0025...0,003$, что в натуральных условиях соответствует $\sim 0,1$ м. Для одного из самых опасных случаев (вылет консоли $L_k = 108$ м на натуре, угол скольжения $\beta = 0^\circ$) применение гасителей уменьшает амплитуды аэроупругих колебаний пролетного строения в $15...20$ раз.

Для натурной конструкции моста предлагаемые гасители представляли собой 12 плоских щитков-интерцепторов с габаритами $3,0 \times 1,5$ м² и общей

массой 2 т, что при массе консоли пролетного строения порядка тысячи тонн не сказывалось на величине напряжений в конструкции от действия их веса (рис. 6). При монтаже на частично надвинутом в пролет строении при вылете более 80 м для исключения колебаний, вызванных самими устройствами, щитки-интерцепторы устанавливались попарно, симметрично продольной оси строения, начиная с ближайших к аванбеку.



Рис. 6. Модель и натурное строение с разработанными гасителями

Выводы. Представленная в работе методика обеспечивает адекватное моделирование аэроупругих колебаний мостовых конструкций на стадии монтажа и, тем самым, позволяет определить их характер для конкретного мостового пролета через р. Обь. Применение разработанных пассивных аэродинамических гасителей привело к уменьшению амплитуды аэроупругих колебаний на модели в 15...20 раз в диапазоне скоростей ветра до 25 м/с.

На начальной стадии надвигки мостового пролета через р. Обь у пос. Красный Яр до установки устройств гашения наблюдались его умеренные колебания. После установки устройств гашения вплоть до окончания работ заметных колебаний не наблюдалось. В октябре 2008 г. участок Северного автодорожного обхода г. Новосибирска, включающий первую очередь мостового перехода через р. Обь, успешно введен в эксплуатацию.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Дмитриев Ф.Д.* Крушение инженерных сооружений. М. : Госстройиздат, 1953. 188 с.
2. Handbook of Structural Engineering [Электронный ресурс] / ed. by Wai-Fah Chen and Eric M. Lui. 2nd edition. CRC Press, 2005. URL: <http://www.crcnetbase.com> (дата обращения: 23.06.2010). Загл. с экрана.
3. About FORCE Technology [Электронный ресурс]. URL: <http://www.forcetechnology.com> (дата обращения: 27.12.2010). Загл. с экрана.
4. *Беспрозванная И.М., Соколов А.Г., Фомин Г.М.* Воздействие ветра на высокие сплошнотенчатые сооружения. М. : Стройиздат, 1976. 183 с.
5. *Загора А.Л., Казакевич М.И.* Гашение колебаний мостовых конструкций. М. : Транспорт, 1983. 132 с.
6. Разработка рекомендаций по снижению динамических нагрузок от воздействия ветра на пролетное строение моста через р. Обь в г. Барнауле : отчет о НИР / рук. А.А. Кураев, отв. исп. С.Д. Саленко. Новосибирск, 1994. 127 с.
7. Аэродинамические испытания Томского моста / С.Д. Саленко, А.Д. Обуховский, В.И. Акопов, А.Б. Канунников // Науч. вестн. НГТУ. 2004. № 3 (18). С. 143—150.
8. В Республике Беларусь рухнул строящийся мост [Электронный ресурс]. URL: <http://forum.bridgeart.ru> (дата обращения: 12.01.2011). Загл. с экрана.
9. *Саленко С.Д., Кураев А.А.* Методика моделирования в аэродинамической трубе распределения скоростей приземного пограничного слоя // Известия СО АН СССР. Серия техническая. 1985. № 16 (409). Вып. 3. С. 110—114.

1. *Dmitriev F.D.* Krusheniye inzhenernykh sooruzheniy. M. : Gosstroyizdat, 1953. 188 s.
2. Handbook of Structural Engineering [Electronnyy resurs] / ed. by Wai-Fah Chen and Eric M. Lui. 2nd ed. CRC Press, 2005. URL: <http://www.crcnetbase.com> (data obrashcheniya: 23.06.2010). Zagl. s ekrana.
3. About FORCE Technology [Electronnyy resurs]. URL: <http://www.forcetechnology.com> (data obrashcheniya: 27.12.2010). Zagl. s ekrana.
4. *Besprozvannaya I.M., Sokolov A.G., Fomin G.M.* Vozdeystviye vetra na vysokiye sploshnostenchatyye sooruzheniya. M. : Stroyizdat, 1976. 183 s.
5. *Zakora A.V., Kazakevich M.I.* Gasheniye kolebaniy mostovykh konstruksiy. M. : Transport, 1983. 132 s.
6. Razrabotka rekomendatsiy po snizheniyu dinamicheskikh nagruzok ot vozdeystviya vetra na proletnoye stroeniye mosta cherez r. Ob' v g. Barnaule : otchet o NIR / ruk. A.A. Kuraev, otv. isp. S.D. Salenko. Novosibirsk, 1994. 127 s.
7. Aerodinamicheskiye ispytaniya Tomskogo mosta / S.D. Salenko, A.D. Obuhovskiy, V.I. Akopov, A.B. Kanunnikov // Nauch. vestn. NGTU. 2004. № 3 (18). S. 143—150.
8. V Respublike Belarus' rukhnul stroyashchiysya most [Electronnyy resurs]. URL: <http://forum.bridgeart.ru> (data obrashcheniya: 12.01.2011). Zagl. s ekrana.
9. *Salenko S.D., Kuraev A.A.* Metodika modelirovaniya v aerodinamicheskoy trube raspredeleniya skorostey prizemnogo pogrannichnogo sloya // Izvestiya SO AN SSSR. Seriya tekhnicheskaya. 1985. № 16 (409), vyp. 3. S. 110—114.

© Саленко С.Д., Обуховский А.Д., Телкова Ю.В., 2011

Поступила в редакцию
в марте 2011 г.

Ссылка для цитирования:

Саленко С.Д., Обуховский А.Д., Телкова Ю.В. Пассивные гасители аэроупругих колебаний пролетного строения моста на стадии монтажа // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2011. Вып. 2 (16). Режим доступа: www.vestnik.vgasu.ru.