

## ГАШЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ МОСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Розглянуто результати теоретичних та експериментальних досліджень конструкційного, динамічного та конструктивного гасіння коливань прогонних будов мостів.

Рассмотрены результаты теоретических и экспериментальных исследований конструкционного, динамического и конструктивного гашения колебаний пролетных строений мостов.

The results of theoretical and experimental tests of the constructional, dynamic and constructive damping of vibrations of the bridge span structures have been considered.

Мостовые конструкции, как и любые реальные механические колебательные системы, обладают свойством диссипации энергии вследствие необратимых процессов, происходящих в материале упругого элемента (рассеяние энергии в материале), в узлах соединений (конструкционное демпфирование), а также в результате потерь энергии колебаний в окружающую среду. Соотношение между этими видами энергетических потерь для различных типов мостов неодинаково и зависит от материала, конструктивных форм моста, а также от условий его работы. Неупругие сопротивления различной природы играют важную роль при колебаниях мостов, так как от них зависят величины амплитуд колебаний пролетных строений, особенно в резонансном режиме.

К **конструкционному** демпфированию относится установка демпфирующих устройств в опорных узлах и опорных частях, использование вибропоглощающих покрытий и сплавов с повышенными демпфирующими свойствами.

Конструкционное демпфирование в мостах может быть увеличено искусственно:

- использованием новых сплавов с высокими диссипативными свойствами для изготовления отдельных элементов и узлов;
- применением специальных вибропоглощающих покрытий, наносимых на поверхность колеблющихся элементов пролетных строений;
- созданием деформационных швов и узлов с дополнительными источниками поглощения;
- созданием демпферных устройств в опорных частях и сочленениях пролетных строений.

Разработаны также **конструктивные** способы гашения колебаний, включающие изменение расчетной схемы конструкции, установку дополнительных опорных точек или оттяжек, изменение изгибной или крутильной жесткости демпфируемой конструкции.

**Динамическое** гашение колебаний, заключающееся в присоединении к основной колеблющейся массе дополнительной массы, составляющей незначительную долю основной. Эта дополнительная масса с элементами связей называется динамическим гасителем колебаний (ДГК). В зависимости от свойств связей различают ДГК:

- представляющие собой дополнительную массу или массы, присоединенные к основной массе при помощи упругого элемента или по схеме маятника;
- представляющие собой дополнительную массу или массы, присоединенные к основной массе связями с элементами трения – демпферами, т. е. амортизаторами;
- в которых дополнительная масса присоединяется к основной массе при помощи упругого и вязкого (или иного) элементов.

**Аэродинамическое** гашение колебаний, идея которого заключается в изменении характера обтекания сооружений или их отдельных элементов ветровым потоком, позволяет существенно снизить нагрузки, обуславливающие возникновение различных аэроупругих явлений.

В некоторых случаях удается устранить основную причину возникновения аэроупругой неустойчивости. Аэродинамические способы гашения колебаний опираются на изменение циркуляции ветрового потока вокруг элементов конструкций, на обеспечение смещения фаз в срыве вихрей Кармана вдоль элементов конструкций при отрывном обтекании, т. е. нарушение синхронизации образования вихрей Кармана вдоль элементов конструкции [1].

Аэродинамическими свойствами мостовых конструкций управляют как на стадии проектирования, так и в процессе строительства и эксплуатации.

В первом случае это достигается путем совершенствования конструктивной формы элементов мостов (пролетных строений, пилонов и т. д.), придания их поперечному сечению удобообтекаемой формы, устройства аэродинамически прозрачного настила.

Во втором случае это достигается чаще всего установкой аэродинамических обтекателей самых разнообразных конструкций. Известны случаи установки обтекателей на мостах через р. Ямато (Япония) и Св. Джона (США), через бухту Лонга и Львиные ворота (Канада), пешеходного висячего моста Ковасаки-Баси (Япония), эффективность которых была предварительно оценена при экспериментальных исследованиях в аэродинамических трубах, а затем подтверждена в условиях эксплуатации [1].

Весьма эффективным при стабилизации колебаний вант вантовых мостов является конструктивное демпфирование.

При этом отдельные ванты с помощью жестких распорок, установленных в местах пучности форм колебаний вант или по другим соображениям, объединяются в «вантовую систему». Благодаря этому, энергия колебаний колеблющейся ванты перераспределяется между соседними вантами и колебания ванты быстро затухают [2].

Заложенная в основу конструктивного гашения колебаний вант идея объединения изолированных вант в «вантовую систему» трансформирует дискретный спектр низших частот всех вант в непрерывный, «размазанный»

В этом случае невозможны ни резонансы любой изолированной ванты, ни колебания «вантовой системы» в целом.

Установленные на одной высоте над проезжей частью распорки между вантами моста через реку Даугава (рис. 1) позволили стабилизировать колебания вант как в процессе сооружения моста, так при его эксплуатации.

Высокой эффективностью гашения колебаний вант обладает «вантовая система», установленная на мосту через реку Днепр (г. Киев). Размещение распорок между вантами на одной высоте над уровнем проезжей части моста и на равном расстоянии от оси пилон (рис. 2) позволяет сместить спектр собственных частот в сторону более высоких значений и «размазать» до практически непрерывного. Это гарантирует невозможность возникновения регулярных резонансных колебаний вант как от ветровых воздействий, так и от временных нагрузок. Наряду с этим, добавочное гашение колебаний вант реализу-

ется непосредственно в узлах их прикрепления к соседним вантам благодаря использованию демпфирующих устройств сухого трения.

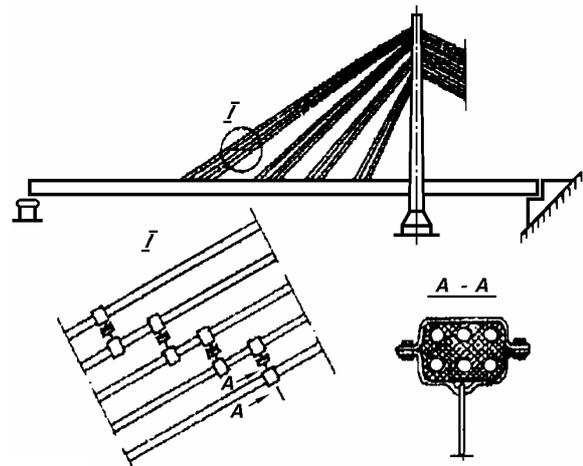


Рис. 1

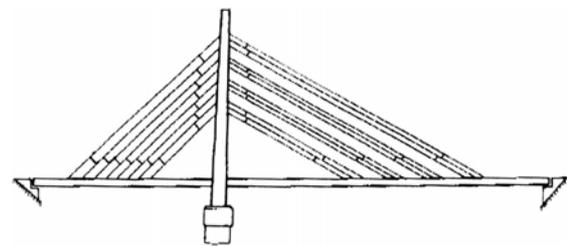


Рис. 2

Установленные на обоих мостах гасители обеспечили эффективное гашение колебаний вант.

Примером динамического гашения колебаний может быть использование дополнительных масс, расположенных на жестких консолях.

Во избежание резонансных колебаний пролетных строений пешеходных мостов периоды собственных колебаний по двум низшим формам (в балочных системах – по одной низшей форме) в вертикальной плоскости не должны располагаться в диапазоне 0,45...0,6 с [3].

В работе [4] рассмотрены теоретические основы регулирования частот и гашения колебаний балочных пешеходных пролетных строений с помощью одной или двух масс, прикрепленных на жесткой консоли к одному или обоим концам балок пролетного строения.

Здесь приведены результаты теоретических исследований вынужденных колебаний типового пролетного строения под пешеходную нагрузку длиной 33 м, на обоих концах которого жестко прикреплены консоли с дополнительными массами  $M_1$  и  $M_3$ .

Исходная расчетная схема с тремя степенями свободы представлена на рис. 3.

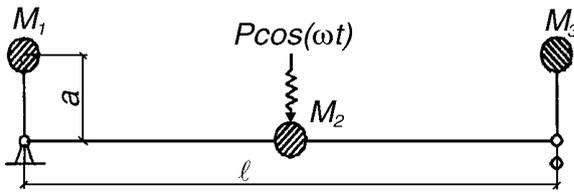


Рис. 3. Исходная расчетная схема динамической системы

Поскольку динамическая система (см. рис. 3) симметричная, она может быть заменена эквивалентной динамической системой, расчетная схема которой приведена на рис. 4.

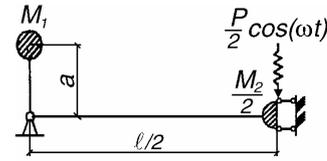


Рис. 4. Эквивалентная расчетная схема

Используя принцип Даламбера, выражения для перемещений масс при вынужденных колебаниях с учетом затухания (1). После преобразования система дифференциальных уравнений (1) приводится к системе (2), удобной для численного интегрирования.

$$\begin{cases} y_1 = -M_1 a^2 \ddot{y}_1 \delta_{11} - \frac{M_2}{2} \ddot{y}_2 \delta_{12} - \frac{h_2}{2} \dot{y}_2 \delta_{12} - h_1 \dot{y}_1 \delta_{11} + \delta_{12} \frac{P}{2} \cos \omega t, \\ y_2 = -M_1 a^2 \ddot{y}_1 \delta_{21} - \frac{M_2}{2} \ddot{y}_2 \delta_{22} - \frac{h_2}{2} \delta_{22} \dot{y}_2 - h_1 \dot{y}_1 \delta_{21} + \delta_{22} \frac{P}{2} \cos \omega t. \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = y_3, \\ \dot{y}_2 = y_4, \\ \dot{y}_3 = -\frac{h_1}{M_1 a^2} y_3 - \frac{\delta_{22}}{M_1 a^2 (\delta_{11} \delta_{22} - \delta_{12}^2)} y_1 + \frac{\delta_{12}}{M_1 a^2 (\delta_{11} \delta_{22} - \delta_{12}^2)} y_2, \\ \dot{y}_4 = \frac{R_0}{M_2} \cos \omega t - \frac{h_2}{M_2} y_4 - \frac{2\delta_{11}}{M_2 (\delta_{11} \delta_{22} - \delta_{12}^2)} y_2 + \frac{2\delta_{12}}{M_2 (\delta_{11} \delta_{22} - \delta_{12}^2)} y_1. \end{cases} \quad (2)$$

Исследования выполнялись для следующих случаев:

- при величине дополнительной массы на консоли  $M_1 = M_3 = 0,005M_2$  и длинах консоли 0,5; 1,0; 1,5 и 1,7 м (неупругие связи отсутствуют);
- при величине дополнительной массы на консоли  $M_1 = M_3 = 0,01M_2$  и тех же длинах консоли (неупругие связи отсутствуют);
- при длине консоли  $a = 1$  м, величине дополнительной массы  $M_1 = M_3 = 0,005M_2$  и наличии неупругих связей этих масс с коэффициентами сопротивления  $h_1$ , равными 1, 2, 3 и 4 коэффициентам сопротивления пролетного строения  $h_2$ ;
- при длине консоли  $a = 1$  м, величине дополнительной массы  $M_1 = M_3 = 0,01M_2$  и наличии

неупругих связей этих масс с коэффициентами сопротивления  $h_1$ , равными 1, 2, 3 и 4 коэффициентам сопротивления пролетного строения  $h_2$ ;

- при длине консоли  $a = 1$  м, величине дополнительной массы  $M_1 = M_3 = 0,001M_2$  и наличии неупругих связей на концах консолей;
- при длине консоли  $a = 1$  м, величине дополнительной массы  $M_1 = M_3 = 0,0001M_2$  (т. е. дополнительная масса практически отсутствует) и наличии неупругих связей на концах консолей.

Результаты вычисленных периодов собственных колебаний динамической системы «пролетное строение + две дополнительные массы на жестких консолях, расположенных на его концах», сведены в табл. 1.

Таблица 1

Состояние пролетного строения	Без дополнительных масс на консолях	С дополнительными массами на консолях длиной, м			
		0,5	1,0	1,5	1,7
Период, сек					
$M_1 = M_3 = 0,05M_2$	0,454	0,682	0,815	1,286	1,576
$M_1 = M_3 = 0,01M_2$	0,454	0,691	0,948	1,712	2,928

График изменения периода собственных колебаний системы «пролетное строение + две дополнительные массы на жестких консолях, расположенных на его концах» представлены на рис. 5.

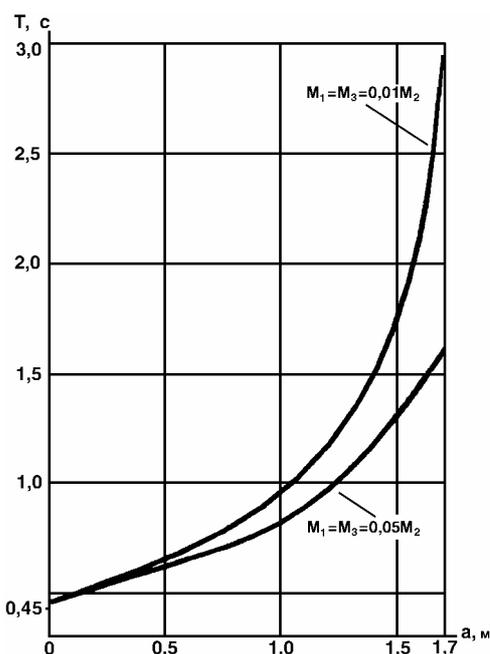


Рис. 5. Зависимость периода собственных колебаний системы от величины масс и длин консолей

Даже дополнительный груз на небольшой консоли ( $a = 0,5$  м) способен значительно изменить период собственных колебаний системы и вывести ее за пределы не рекомендованного нормами диапазона.

Амплитуды вынужденных колебаний середины пролетного строения с двумя расположенными на его концах жесткими консолями с дополнительными массами  $M_1$  и  $M_3$  уменьшаются почти в 30 раз (табл. 2).

При этом изменение консоли больше  $a = 0,5$  м практически не сопровождается уменьшением амплитуды вынужденных колебаний середины пролетного строения.

Поэтому дальнейшие исследования выполнялись при длине жесткой консоли  $a = 0,1$  м. Тем более, что при такой длине консоли дополнительные массы удобно совмещать с перильными стойками пролетного строения. Результаты исследования влияния изменения диссипативных свойств неупругих связей масс  $M_1$  и  $M_3$  сведены в табл. 3.

Нетрудно убедиться в том, что амплитуда вынужденных колебаний середины пролетного строения с увеличением диссипативных свойств неупругих связей масс  $M_1$  и  $M_3$  практически не изменяется.

Таблица 2

Состояние пролетного строения	Без дополнительных масс на консолях	С дополнительными массами на консолях длиной, м			
		0,5	1,0	1,5	1,7
		Амплитуда, мм			
$M_1 = M_3 = 0,05M_2$	40,0	1,283	1,282	1,282	1,281
$M_1 = M_3 = 0,01M_2$	40,0	1,292	1,284	1,271	1,269

Таблица 3

Состояние пролетного строения	Без дополнительных связей	С неупругими связями, $h_1 / h_2$			
		1,0	2,0	3,0	4,0
		Амплитуда, мм			
$M_1 = M_3 = 0,05M_2$	1,282	1,285	1,284	1,284	1,284
$M_1 = M_3 = 0,01M_2$	1,284	1,300	1,298	1,297	1,295
$M_1 = M_3 = 0,001M_2$	1,284	1,281	1,280	1,280	1,280
$M_1 = M_3 = 0,0001M_2$	1,284	1,284	1,284	1,283	1,282

Следует обратить внимание на тот факт, что введение неупругих связей масс  $M_1$  и  $M_3$  с разными диссипативными свойствами способствуют увеличению скорости затухания собственных колебаний системы «пролетное строе-

ние + две дополнительные массы на жестких консолях, расположенных на его концах».

На рис. 6 представлена виброграмма собственных затухающих колебаний системы «пролетное строение + две дополнительные массы

$M_1 = M_3 = 0,05M_2$  на жестких консолях» (неупругие связи отсутствуют). Логарифмический декремент, характеризующий темп затухания собственных колебаний, равен  $\delta = 0,0693$ .

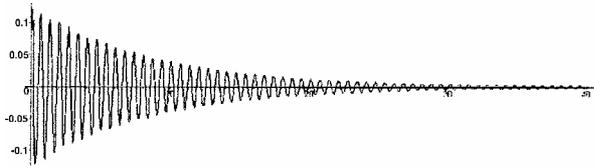


Рис. 6

Виброграмма собственных затухающих колебаний той же системы, но с неупругими связями масс  $M_1$  и  $M_2 = 0,005M_2$  (рис. 7), коэффициенты сопротивления которых  $h_1 = 4h_2$ , характеризуется декрементом колебаний  $\delta = 0,098$ .

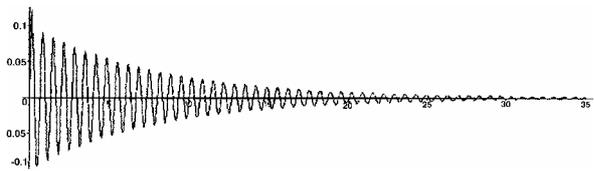


Рис. 7

Увеличение коэффициента неупругого сопротивления связей масс  $M_1 = M_3 = 0,005M_2$  до  $h_1 = 50h_2$  сопровождается дальнейшим повышением скорости затухания собственных колебаний (рис. 8).

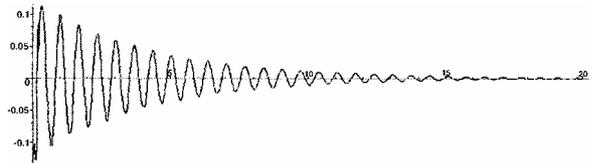


Рис. 8

Логарифмический декремент колебаний увеличивается до  $\delta = 0,178$ . Выполненные теоретические исследования влияния дополнительных масс на жестких консолях, расположенных на концах пролетного строения, позволяют сделать следующие выводы:

- динамическая система «пролетное строение + две массы на жестких консолях» позволяют регулировать периоды (частоты) собственных колебаний в широком диапазоне, благодаря чему исключается резонансный режим колебаний пролетных строений пешеходных мостов и повышается комфортность пешеходов;

- использование дополнительных масс на жестких консолях позволяет регулировать амплитуду вынужденных колебаний середины пролетного строения в широком диапазоне;

- увеличение диссипативных свойств неупругих сопротивлений дополнительных масс

способствует скорейшему затуханию собственных колебаний динамической системы «пролетное строение + дополнительные массы на жестких консолях».

Все это повышает комфортность пешеходов, надежность и долговечность пролетных строений пешеходных мостов.

Одним из эффективных и перспективных решений конструкционного гашения колебаний является расположение демпферных устройств между торцами смежных пролетных строений или торцами пролетных строений и шкафными стенками устоев. При этом демпфирующее устройство может работать на сухом (рис. 9) или вязком трении (рис. 10) [5].

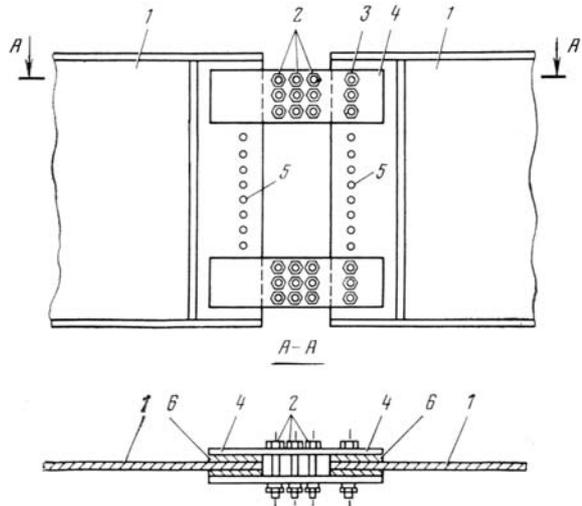


Рис. 9. Устройство для гашения колебаний разрезных пролетных строений мостов:

- 1 – стенка главной балки смежных пролетных строений;
- 2 – высокопрочные болты нажимного элемента;
- 3 – высокопрочные болты; 4 – парные пластины;
- 5 – монтажные отверстия в стенках главных балок;
- 6 – фрикционные прокладки

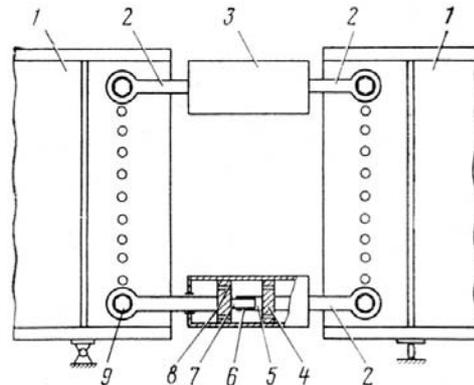


Рис. 10. Устройство для гашения колебаний разрезных пролетных строений:

- 1 – пролетное строение; 2 – шток; 3 – цилиндр;
- 4 – поршень; 5 – внешняя гильза; 6 – уплотнение между гильзами; 7 – внутренняя гильза; 8 – калиброванные отверстия в поршне; 9 – шарнир крепления.

Основное преимущество расположения демпферных устройств, при котором смежные пролетные строения неупруго соединены между собой, – увеличение общей колеблющейся массы каждого пролетного строения и гашение колебаний в устройстве. Эти устройства позволяют сохранять все преимущества разрезной системы, как, например, независимость от осадок опор, независимое температурное расширение–укорочение и т. д., в то же время позволяют исключить передачу демпфирующих сил на опоры.

Теоретические и натурные исследования с использованием демпфирующих устройств сухого трения выполнены на автодорожных сталежелезобетонных пролетных строениях длиной 42,5 м.

Пролетное строение испытывалось подвижной нагрузкой без демпфирующего устройства и с устройством с разной степенью зажатия парных пластин. В результате выполненных экспериментальных исследований достигнуто увеличение декремента колебаний в 2,5 раза по сравнению с декрементом колебаний пролетного строения без демпфирующего устройства (рис. 11). Увеличение логарифмического декремента колебаний с усилением демпфирования сопровождалось снижением амплитуд вынужденных колебаний, характеризуемых динамическим коэффициентом  $(1+\mu)$  – отношением динамического прогиба к статическому (рис. 12). Разница между теоретическими и экспериментальными динамическими коэффициентами обусловлено невозможностью теоретического учета микропрофиля проезжей части моста.

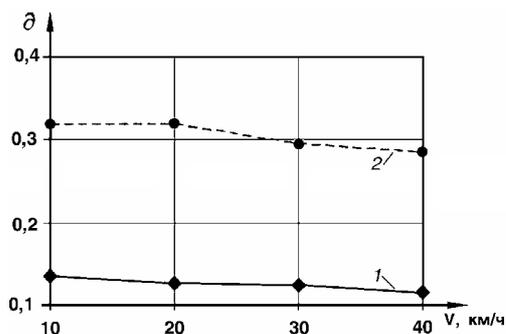


Рис. 11. Значения логарифмического декремента колебаний пролетного строения:  
1 – без демпфирования; 2 – с демпфированием

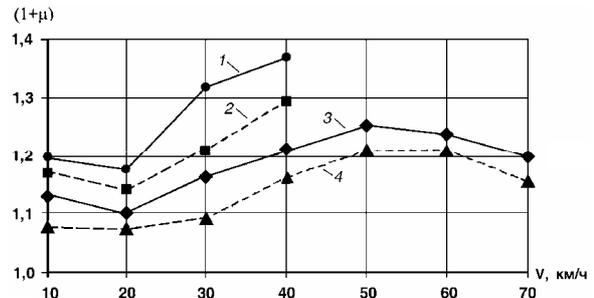


Рис. 12. Зависимость динамического коэффициента от демпфирования колебаний при различных скоростях движения испытательной нагрузки:  
1 – экспериментальные динамические коэффициенты без демпфирования; 2 – то же с демпфированием;  
3 – теоретические динамические коэффициенты без демпфирования; 4 – то же с демпфированием

Рассмотренные способы гашения колебаний мостовых конструкций свидетельствуют об их самодостаточности и эффективности.

Гашение опасных и вредных колебаний пролетных строений, их отдельных элементов обеспечивает повышение их надежности и долговечности и повышает комфортность пользователей.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Загора А. Л. Гашение колебаний мостовых конструкций / А. Л. Загора, М. И. Казакевич. – М.: Транспорт. 1983. – 134 с.
2. Kazakevitch M., Zakora O. Cable stabilization for wind and moving load effect. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 74-76 (1998) 995-1003.
3. СНиП 2.05.03-84\*. Мосты и трубы. Минстрой России. – М., 1996 – 200 с.
4. Загора А. Л. Регулирование частот и гашение колебаний пролетных строений пешеходных мостов. Сб. «Автомобильные дороги и дорожное строительство», № 59 УТУ, 2000, – С. 53–58.
5. Zakora O. Design damping of oscillations of span constructions of bridges. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering, Slovak Republic, May 19–22, 2003.

Поступила в редколлегию 14.09.2004.