

УДК 624.042.8

Е. В. ДЕНИСОВ, С. А. ФОМЕНКО

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,
Макеевка, Украина*

ДИНАМИЧЕСКИЙ ГАСИТЕЛЬ КОЛЕБАНИЙ ДЛИННОМЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ БАЛОЧНОГО ТИПА

В статье рассматривается проблема демпфирования колебаний строительных конструкций. На основе анализа математической модели системы с двумя степенями свободы предложена конструкция гасителя колебаний элементов балочного типа, установленных при реконструкции на фасаде ДП КСКЦ «Концерн Стирол». Согласно архитектурной идее фасада данные элементы представляют несвязанные между собой консоли вылетом 6–7 м и подвержены эффектам вихревого возбуждения колебаний в ветровом потоке, при которых могут возникать устойчивые вибрации повышенного уровня поперек ветрового потока. Произведены натурные динамические испытания работы конструкций с гасителями колебаний и без них с целью получения информации об эффективности применения предложенных устройств.

Введение. Проблема вибраций конструкций сегодня актуальна как в строительстве, так и в других областях техники. В машиностроении, особенно транспортном [1], встречается огромное количество различных специальных демпфирующих устройств, снижающих (поглощающих) амплитуды вынужденных колебаний конструкций. Это различные гасители (в том числе – динамические и ударные) и поглотители колебаний, виброударные демпферы, листовые рессоры с сухим трением, клиновые амортизаторы и др. Следует признать, что в строительных объектах применяются такие устройства значительно реже. Наиболее актуальным является применение таких устройств в случае, когда динамическая составляющая внутренних усилий в элементах конструкций по сравнению со статической весьма существенна. Одинаково важным является гашение колебаний как отдельных длинномерных сооружений типа высотных относительно гибких зданий, башен (сплошных и решетчатых, стальных и железобетонных), труб, мачт и т. п., так и их элементов [2, 6]. При действии ветровых, сейсмических, транспортных, технологических и других динамических нагрузок возникают колебания всего сооружения, амплитуды которых необходимо уменьшать [4].

В 2013 г. появилась необходимость гашения колебаний длинномерных ферменных конструкций консольного типа (рисунок 1), которые являются декоративными элементами центрального фасада ДП КСКЦ ПАО «Концерн Стирол» в г. Горловка.



Рисунок 1 – Общий вид здания после реконструкции (фасад 1-19)

Декоративные элементы (рисунок 2) представляют собой отдельные несвязанные консольные элементы вылетом 6–7 м, которые совершают сложные колебания в ветровом потоке.

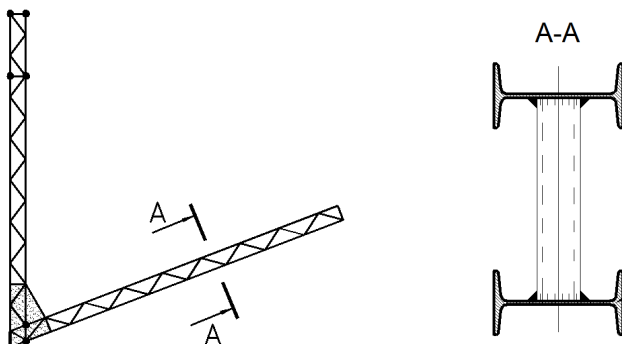


Рисунок 2 – Схема Г-образной фермы декоративных элементов фасада

Конструкции стальных ферм декоративных элементов представляют собой Г-образные элементы (рисунок 2), вертикальная часть которых прикреплена на фасаде здания к элементам усиления. Вертикальная часть представляет собой ферму, пояса которой выполнены из двутавра № 18 и гнутосварной трубы 180×100×6, решетка – из гнутосварной трубы 60×3 мм. Горизонтальная часть выполнена в виде фермы с поясами из двутавра № 18, решетка

ферм – из гнutosварной трубы 60×3 мм. Снаружи данные конструкции обшиты композитным материалом.

Наибольшую проблему представляют резонансные явления, при которых амплитуды перемещений имеют существенное значение. Из-за плотности спектра низших частот в данном случае могут возникать эффекты биений. Одним из наиболее опасных видов резонансных возмущений для данных декоративных элементов фасада является эффект вихревого возбуждения колебаний в потоке ветра [3, 5, 7, 8, 11], при котором могут возникать устойчивые вибрации повышенного уровня поперек ветрового потока при периодичном срыве вихрей (вихрей Кармана). Амплитуды этих колебаний зависят от формы поперечного сечения элементов, жесткостных и диссипативных свойств элементов в плоскости колебаний [8–10].

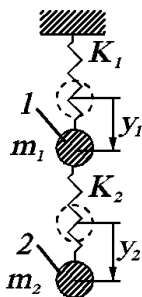


Рисунок 3 – Расчетная схема длинно-мерного элемента фасада

с динамическим гасителем колебаний:

1 – консольный элемент ферменной конструкции; 2 – гаситель колебаний

Расчет гасителя колебаний. Совместную работу горизонтальной части ферменной конструкции и гасителя колебаний представим в виде системы с двумя степенями свободы (рисунок 3).

Рассмотрим вынужденные колебания двух грузов, закрепленных на пружинах, под действием гармонической возмущающей силы $P(t) = P \sin \theta t$ (рисунок 3) без учета диссипативных сил. Эту силу приложим к моделирующему длинномерные конструкции фасада телу 1 с массой m_1 , и получим систему уравнений:

$$\begin{cases} y_1'' + ay_1 - by_2 = q \sin \theta t; \\ y_2'' - cy_1 + cy_2 = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $a = \frac{k_1 + k_2}{m_1}$, $b = \frac{k_2}{m_1}$, $c = \frac{k_2}{m_2}$, $q = \frac{P}{m_1}$.

Также заметим, что при отсутствии гасителя – пружины с коэффициентом жесткости k_2 и массой m_2 соотношение $\frac{k_1}{m_1}$ представляет собой квадрат частоты собственных колебаний системы с одной степенью свободы:

$$\omega_0^2 = \frac{k_1}{m_1} = a - b. \quad (2)$$

Так как сопротивление движению не учитывается, то сдвига фаз между возмущающей силой и вызываемым ею движением не будет, а частное ре-

шение системы (1), соответствующее вынужденным колебаниям, можно взять в виде:

$$y_1 = A_1 \sin \theta t; y_2 = A_2 \sin \theta t. \quad (3)$$

Подставляя это решение в систему (1), получаем амплитуды:

$$A_1 = \frac{q(c - \theta^2)}{(a - \theta^2)(c - \theta^2) - bc}; A_2 = \frac{qc}{(a - \theta^2)(c - \theta^2) - bc}. \quad (4)$$

Из полученного выражения A_1 следует, что при $\theta = \sqrt{c} = \sqrt{\frac{k_2}{m_2}}$ тело 1 не перемещается. Это позволяет выбрать оптимальные параметры гасителя колебаний из условия, что ферменная конструкция будет оставаться в покое, даже если возмущающая нагрузка приложена именно к ней.

Частота собственных колебаний отдельно взятой консольной части ферменной конструкции определялась как для весомой консольной балки с погонной массой m и сосредоточенной массой M на краю консоли (рисунок 4):

$$\omega = k^2 \sqrt{\frac{EI}{m}}, \quad (5)$$

где k – волновое число; EI – изгибная жесткость консольной части ферменной конструкции.

Расчетная схема динамического гасителя колебаний ферменной конструкции представляет собой невесомую консольную балку с сосредоточенной массой M на ее краю.

По известному коэффициенту жесткости k_2 и частоте вынужденных колебаний $\theta = \omega$ определяем вылет l консоли пластинчатого гасителя колебаний:

$$l = 3 \sqrt{\frac{3EI}{M\omega^2}}, \quad (6)$$

Масса динамического гасителя колебаний лежит в пределах 1–3 % от массы горизонтальной части ферменной конструкции.

Натурные испытания. Для снижения амплитуд колебаний в резонансном режиме ферменных конструкций декоративных элементов входной группы были применены специальные пластинчатые гасители (рисунок 5). Гаситель состоит из консольно закрепленной на ферме пластины с сосредоточенной на краю массой, которая может для точной настройки перемещаться вдоль пластины. Настройка гасителя производится перемещением массы так, что в резонансном режиме колебаний фермы демпфер колеблется в про-

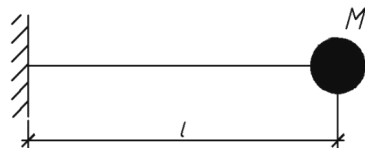


Рисунок 4 – Расчетная схема динамического гасителя колебаний

тивофазе к основной конструкции, что приводит к уменьшению амплитуд ее колебаний и рассеиванию энергии колебаний. Также, для увеличения диссипативных сил при колебаниях ферм применены специальные прокладки из фторопласта в местах примыкания к стальным фермам облицовки из композита.

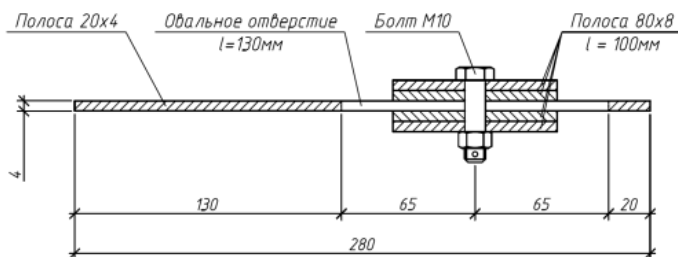


Рисунок 5 – Принципиальная схема пластинчатого гасителя колебаний



Рисунок 6 – Установленный гаситель на конструкции фермы

Процесс настройки и анализа работы гасителя осуществлялся в следующем порядке.

1 Из системы исключались колебания гасителя путем его фиксации к ферме проволокой. В этом случае колебания совершала только ферма.

2 Регулированием частоты вынуждающей силы подбирался резонансный режим, как режим с максимальной амплитудой перемещений. Перемещения фиксировались как по виброграмме в режиме реального времени на экране монитора, так и дополнительно по геодезической рейке, установленной рядом с испытуемой фермой.

3 Снималась фиксация гасителя и путем перемещения сосредоточенной массы подбирался режим с наименьшей амплитудой перемещений фермы. В

этом положении масса фиксировалась, закреплялась сваркой, а показания амплитуды сохранялись для последующего анализа.

Результаты анализа изменения амплитуды колебаний ферменных консольных элементов фасада при установке пластинчатого гасителя колебаний для четырех основных типов ферм приведены в таблице 1.

По полученным виброграммам также определялись логарифмические декременты колебаний конструкций в состоянии без гасителя и с ним. Данные приведены в таблице 2.

Таблица 1 – Амплитуды колебаний края консоли стальных ферм

Место измерения	Амплитуда колебаний, см		Отношение амплитуд колебаний
	без гасителя	с гасителем	
Ферма № 1	3,5	2,4	1,45
Ферма № 2	3,0	2,0	1,50
Ферма № 3	2,8	1,6	1,75
Ферма № 4	2,7	1,6	1,68
<i>Примечание</i> – Колебания вызывались вибромашиной с насаженными эксцентриками массой 1,387 кг каждый, расположенными на расстоянии 0,06 м от оси вращения шестерни.			

Таблица 2 – Логарифмические декременты колебаний ферм

Место измерения	Логарифмический декремент колебаний		Отношение декрементов колебаний
	без гасителя	с гасителем	
Ферма № 1	0,0070	0,0273	3,90
Ферма № 2	0,0088	0,0277	3,15
Ферма № 3	0,0077	0,0278	3,61
Ферма № 4	0,0081	0,0285	3,52

Выводы. В результате выполнения работы:

1 На основании теоретических исследований были определены характеристики восьми гасителей колебаний.

2 Произведены динамические испытания, которые показали, что применения предлагаемых демпферов позволяет повысить логарифмический декремент колебаний в 3–3,5 раза и уменьшить амплитуду колебаний ферменных конструкций в резонансном режиме в 1,5–2 раза.

3 Изготовлены, смонтированы и настроены предложенные демпферы на восьми фермах декоративных элементов входной группы ДП КСКЦ ПАО «Концерн Стирол».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Вибрации в технике: справочник. В 6 т. / ред. совет: В. Н. Челомей (пред.) – Т. 6. Защита от вибрации и ударов / под ред. К. В. Фролова. – М.: Машиностроение, 1981. – 456 с.

2 **О влиянии смежных пространственных конструкций и инерционно-ударных гасителей на параметры ветрового резонанса балочных конструкций** / Е. В. Горохов [и др.] // Дороги і мости. – Київ: ДерждорНДі, 2008. – Вип. 9.– С. 60–69.

3 Eurocode 1: Actions on Structures – General Actions – Part 1–4: Wind Actions.– Willsupersede ENV 1991-2-4:1995; introduced January 2004. – Brussels: CEN/TC 250, 2002.– 148 p.

4 **Matsagar, V. A.** Viscoelastic damper connected to adjacent structures involving seismic isolation / V. A. Matsagar, R. S. Jangid // Journal of civil engineering and management. – 2005, № 11 (4). – P. 309–322.

5 **Solari, G.** Probabilistic 3-D Turbulence Modelling for Gust Buffeting of Structures / G. Solari, G. Piccardo // Probabilistic Engineering Mechanics. – 2001. – № 16. – P. 73–86.

6 **Kulyabko, V. V.** Simulation of nonlinear oscillations and protection of modern unique buildings and structures / V. V. Kulyabko, A. V. Maslovskiy, A. V. Banakh // Advanced Problems in Mechanics Conference APM'2007. Book of Abstracts of XXXV Summer School. Saint-Petersburg, Russia, 20–28 June 2007. – SPb: IPME RAN, 2007. – P. 73–74.

7 **Wisse, J. A.** Wind comfort assessment by CFD / J. A. Wisse, H. W. Krus, F. Willemssen // Impact of Wind and Storm on City life and Built Environment, Proceeding of the Workshop, June 3–4 2002, Nantes (France).

8 **Барштейн, М. Ф.** Воздействие ветра на здания и сооружения / М. Ф. Барштейн // Нагрузки и надежность строительных конструкций: Труды ЦНИИСК. – М.: Стройиздат, 1973. – Вып. 21. – С. 65–84.

9 **Кулябко, В. В.** Актуальные проблемы динамики сооружений / В. В. Кулябко, М. И. Казакевич // Металеві конструкції. – 1998. – № 1. – С. 65–74.

10 **Кулябко, В. В.** Обобщенные динамические расчетные модели, натурные диагностические испытания и виброэкология сложно-составных строительных конструкций и объектов / В. В. Кулябко // Proc. Polish-Ukrainian Seminar “Theoretical Foundations in Civil Engineering”, Warsaw (Poland), 1997. – № 5. – P. 139–146.

Ye. V. DENISOV, S. A. FOMENKO

THE DYNAMIC DAMPER FOR THE BEAM TYPE LONG STRUCTURES

The problem of structures oscillations damping is considered in the article. Based on the mathematical model of the system with two degrees of freedom there was proposed the dynamic damper for the beam type constructions installed at the DP KSKTS "Concern Styrene" facade during reconstruction. In accordance with the architectural concept of the facade, the above-mentioned beams are not connected with each other and their length is 6–7 m. So they are exposed to the effects of vortical excitation oscillations in the wind flow and the high level vibration-resistant oscillations across the wind flow can appear. There were performed the full-scale dynamic tests of the structures work with dampers and without them to obtain the information of the proposed devices effectiveness.

Получено 22.01.2014