ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОДНОМАССОВЫХ ИНЕРЦИОННЫХ ДЕМПФЕРОВ НА АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАЛЬНЫХ КАРКАСОВ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ

А. В. Жуков, А. А. Кикоть

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

Выполнено исследование влияния трех вариантов одномассовых инерционных демпферов на амплитудно-частотные характеристики стального каркаса высотного здания. Разработаны четыре расчетные модели и три варианта демпферов. Проведено 36 расчетов с учетом различных частот возмущающих сил, имитирующих ветровое воздействие. Установка демпферов обеспечивает уменьшение амплитуд и ускорений при колебаниях до 40-50%.

Ключевые слова: гашение колебаний, инерционный демпфер, TMD, стальной каркас, SAP2000, динамический расчет, Time-History Analysis.

Колебания высотного сооружения при ветровом воздействии могут быстро привести к его разрушению если возникнет резонанс, и амплитуда достигнет чрезмерных значений. Однако, обычно колебания не являются настолько энергичными, чтобы нанести вред конструкциям сооружения, однако могут доставить серьезный дискомфорт людям, находящимся на верхних этажах.

Для современных высотных зданий контроль горизонтальных перемещений этажей для обеспечения санитарных требований может оказаться большим вызовом, чем необходимость обеспечения конструктивной прочности сооружений. Ускорение - это естественный фактор всех динамических воздействий. Горизонтальная сила, ощущаемая людьми напрямую пропорциональна горизонтальному же ускорению, сообщаемому сооружению, по первому закону Ньютона. Согласно исследованиям [1] наиболее чувствительные люди способны ощутить ускорения начиная с одной тысячной доли ускорения свободного падения. В отечественном нормативном документе [2] предельное допустимое горизонтальное ускорение этажа ограничено значением 0,08 м/с² при ветровой нагрузке, равной 70% нормативного значения ее пульсационной составляющей. Однако, понимание того, что удовлетворения требований динамической комфортности зданий при их проектировании с учетом лишь указанных в нормативных документах эквивалентных статических нагрузок недостаточно для их нормальной эксплуатации в условиях сильных штормов и ураганов пришло к инженерам благодаря анализу опыта эксплуатации мно-

ПОЛЗУНОВСКИЙ АЛЬМАНАХ № 1 2016

жества существующих высоток. В обычной практике существует лишь три фактора, которые можно контролировать при проектировании таких сооружений: высота, форма и масса, влияющая на динамический ответ здания [3]. Ограничение чрезмерных колебаний может быть достигнуто тремя способами: увеличением жесткости для уменьшения периода колебаний, контролем массы и специальным проектированием формы здания для улучшения его аэродинамических свойств.

Приведенные выше традиционные подходы к проектированию применимы лишь в некоторых границах, за которыми встают серьезные вопросы о физической возможности реализации проектов, их стоимости и эстетических качествах. Таким образом, внимание практикующих инженеров все чаще обращается к различным демпфирующим устройствам, как средствам, позволяющим гасить колебания сооружений при ветровых воздействиях [4]. Одним из таких средств является инерционный демпфер, представляющий собой устройство, состоящее из массы, прикрепленной к основному сооружению посредством пружины и собственно демпфирующего элемента. Изображение самого знаменитого инерционного демпфера в Тайваньском здании Таіреі 101 приведено на рисунке 1. Роль пружины могут выполнять vстройства, обеспечивающие связь массы с сооружением с некоторой жесткостью К. В настоящей работе рассматриваются инерционные демпферы, роль пружины в которых выполняет подвес, соединяющий несущие конструкции сооружения с массой, образуя, таким образом, маятник.



Рисунок 1 – Инерционный демпфер Таіреі 101



Рисунок 2 – Принципиальная расчетная схема

В расчетах принято использовать аналогичную маятнику систему конечных элементов с эквивалентной жесткостью K_d и демпфированием c_d .

В роли демпфирующих устройств обычно применяют элементы вязкого трения: масляные буферы. Такие устройства представляют собой цилиндры с жидкостью, в которых перемещаются перфорированные или неплотно прилегающие поршни.

Таким образом, каждое колебание массы рассеивает часть энергии колебаний сооружения и снижает амплитуды и ускорения его колебаний.

Общая динамическая расчетная схема системы с демпфером изображена на рисунке 2.

Груз в инерционном демпфере имеет сравнительно небольшую массу. Оптимально применение инерционных демпферов с массами, равными от 1 до 5% модальной массы сооружения в форме колебаний, на которую осуществляется настройка [5]. Таким образом, масса груза в инерционном демпфере $M_{\rm d}$, т определяется по формуле

$$M_{\rm d} = \mu \cdot M, \tag{1}$$

где μ = от 1 до 5 – рекомендуемый процент от участвующей в колебаниях модальной массы сооружения; *М* – участвующая в колебаниях модальная масса сооружения, т.

Требуемая частота колебаний маятника $p_{\rm d},$ Гц определяется по формуле

$$p_{\rm d} = p \cdot f, \tag{2}$$

где *p* – частота собственных колебаний сооружения, Гц; *f* – рекомендуемое соотношение частот.

Рекомендуемое соотношение частот *f* для системы с демпфированием определяется по формуле

$$f = 1 / (1 + \mu).$$
 (3)

Эквивалентная жесткость пружины для моделирования демпфера *K*_d, тс/м определяется по формуле

$$K_{\rm d} = M_{\rm d} \cdot g / L_{\rm d}, \qquad (4)$$

Где g = 9,81 – ускорение свободного падения, м/с²; L_d – длина маятника, м.

Длина маятника *L*_d, м определяется по формуле

$$L_{\rm d} = (T_{\rm d} / [2 \cdot \pi]) \cdot g. \tag{5}$$

Эффективное демпфирование *c*_d, тс·с/м определяется по формуле

$$c_{\rm d} = \zeta \cdot \pi^{-1} \cdot (K_{\rm d} \cdot M_{\rm d})^{0,5}, \qquad (6)$$

где ζ – коэффициент демпфирования.

Коэффициент демпфирования показывает долю от критического демпфирования для рассматриваемого маятника и для системы с наилучшей настройкой определяется по графику, изображенному на рисунке 3 [6].



ПОЛЗУНОВСКИЙ АЛЬМАНАХ № 1 2016

Для проведения настоящего исследования, после рассмотрения нескольких вариантов, была выбрана некоммерческая версия компьютерной программы CSi SAP2000, позволяющая моделировать элементы вязкого трения и выполнять нелинейный Time-History расчет строительных конструкций.

Кроме того, для исследования была разработана расчетная схема каркаса пятидесятисемиэтажного офисного здания высотой 171 м со стальным рамно-связевым каркасом из двутавровых элементов.

Размеры каркаса в осях 1-6, А-F составляют 29,25×29,25 м. Высота каждого из этажей – 3,0 м.

Вертикальные диафрагмы жесткости расположены в периметральных рамах сооружения в осях 1-2, 3-4, 5-6, А-В, С-D и Е-F, образуя, таким образом, пространство для свободной планировки помещений на всех этажах. Для обеспечения дополнительной жесткости здания в расчетную схему введены экономичные дополнительные аутригерные периметральные связевые фермы на каждом седьмом и восьмом этажах, а также на первом этаже.

Внешний вид расчетной схемы в SAP2000, а также вид наружной рамы изображены на рисунке 4.

Нижние узлы колонн первого этажа закреплены путем устройства жесткой заделки. Узлы примыкания элементов вертикальных связей к фундаментам закреплены шарнирно.

Для назначения жесткостей элементам в расчетную схему были введены параметрические жесткости для двутавровых стержневых элементов.

Постоянные нагрузки от веса стальных несущих конструкций сформированы автоматически на основе погонных масс стержневых элементов. Постоянные нагрузки от веса перекрытий, перегородок, оборудования и стенового ограждения приняты на основе опыта проектирования; расчетное значение составляет 0,360 тс/м². В силу того, что в здании предусмотрено размещение офисных помещений расчетное значение временной нагрузки составляет 0,240 тс/м².

Статические составляющие нагрузок от ветровых воздействий в программе SAP2000 возможно сформировать автоматически путем задания горизонтальных дисков жесткости, к которым будут приложены линейно распределенные по стержням нагрузки.

Нагрузки сформированы на основе [7] для здания, находящегося на городской территории (категория территории III) в районе

ПОЛЗУНОВСКИЙ АЛЬМАНАХ № 1 2016

ветровыми давлениями, сходными с ветровым районом III по [2], к которому относится город Барнаул Алтайского края.

Массы для динамических загружений собраны из значений вертикальных нагрузок, имеющих гравитационную природу.

Моделирование инерционного демпфера в программе SAP2000 производится путем добавления в расчетную схему двух конечных элементов типа Link, моделирующих пружину и вязкий демпфер соответственно. При этом, жесткость пружины, имитирующей маятник, в горизонтальных направлениях зависит от длины маятника и массы груза, а коэффициент демпфирования демпфера зависит от конструктивного решения демпфирующих устройств и базируется на параметрах маятника, обеспечивая оптимальный процент от критического демпфирования для выбранного маятника. Конечноэлементное представление демпфера (вид снизу) изображено на рисунке 5.



Рисунок 4 – Расчетная схема в SAP2000



Рисунок 5 – Инерционный демпфер прикреплен к верхнему перекрытию сооружения

Таблица 1 с результатами модального анализа, касающимися первой поступательной формы колебаний сооружения представлена ниже.

В исследовании проведено по девять расчетов для каждого из вариантов демпфирования стального каркаса высотного здания с частотами возмущающих сил, соответствующими 100%, а также 60%, 70%, 80%, 90%, 110%, 120%, 130% и 140% частоты собственных колебаний, на которую осуществляется настройка инерционного демпфера. Таблица 2 с параметрами функций, описывающих динамический характер ветровой нагрузки, приведена ниже. Характер возмущающей функции на примере функции 1 изображен на рисунке 6.

В рамках исследования рассмотрено три варианта инерционных демпферов с разной массой груза, соответствующей нижнему (1%) среднему (2,5%) и верхнему (5%) уровню рекомендуемого диапазона значений массы демпфера в зависимости от эффективной модальной массы сооружения. При изменении массы меняется параметр μ , отвечающий за наилучшую настройку демпфера на частоту сооружения, а также коэффициент демпфирования ζ , устанавливающий оптимальный уровень диссипации энергии колебаний груза на подвесе при колебаниях сооружения.

Параметры демпферов представлены в таблице 3. Результаты расчетов представлены в таблицах 4 и 5. Изображения амплитудно-частотных характеристик приведены на рисунках 7 и 8.

Табл	ица 1 –	 Результа 	т модального	анализа
------	---------	------------------------------	--------------	---------

Параметр	Значение
Номер формы	1
Собственная частота колебаний, Гц	0,1706
Участвующая масса, т	22731,7
В том числе: 1%, т	227,3
2,5%, т	568,3
5%, т	1136,6

Таблица 2 – Параметры возмущающих функций

Номер функции	Для периода собствен- ных колебаний	Период функции, с	
1	1,0	5,86	
2	0,6	3,52	
3	0,7	4,10	
4	0,8	4,69	
5	0,9	5,27	
6	1,1	6,45	
7	1,2	7,03	
8	1,3	7,63	
9	1,4	8,20	

Таблица 3 – Параметры демпферов

№ п/п	<i>М</i> _d , т	μ	f	<i>р</i> _d , Гц	<i>L</i> _d , м	<i>К</i> _d , тс/м	ζ	С _d , тс∙с/м
1	227,3	0,010	0,990	0,169	8,70	26,12	0,08	0,627
2	568,3	0,025	0,976	0,166	8,96	63,41	0,10	1,93
3	1137	0,050	0,952	0,163	9,40	120,9	0,12	4,52

Таблица 4 – Результаты по перемещениям

	Наибольшее перемещение, м					
период, с	Без д.	Bap. 1	Bap. 2	Bap. 3		
3,52	0,0937	0,0886	0,0874	0,0859		
4,10	0,1556	0,0997	0,1077	0,1029		
4,69	0,1597	0,1481	0,1402	0,1685		
5,27	0,2763	0,3148	0,3627	0,4274		
5,86	0,7496	0,2657	0,3129	0,3166		
6,45	0,4174	0,3617	0,1596	0,1367		
7,03	0,2137	0,2464	0,2446	0,1226		
7,63	0,1545	0,1433	0,1858	0,1996		
8,20	0,1266	0,1258	0,1353	0,1846		

I аблица 5– Результаты по ускорениям

	Наибольшее ускорение, м/с ²					
период, с	Без д.	Bap. 1	Bap. 2	Bap. 3		
3,52	0,1093	0,0962	0,0979	0,0995		
4,10	0,1298	0,1265	0,1234	0,1262		
4,69	0,1783	0,1698	0,1720	0,2113		
5,27	0,3082	0,3724	0,4703	0,5585		
5,86	0,8644	0,2818	0,3381	0,3458		
6,45	0,3983	0,3220	0,1361	0,1132		
7,03	0,1728	0,1960	0,1812	0,0824		
7,63	0,1060	0,0906	0,1276	0,1262		
8,20	0,0761	0,0704	0,0813	0,1082		



Рисунок 6 – Функция 1



ристика каркаса для перемещений

ПОЛЗУНОВСКИЙ АЛЬМАНАХ № 1 2016

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОДНОМАССОВЫХ ИНЕРЦИОННЫХ ДЕМПФЕРОВ НА АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАЛЬНЫХ КАРКАСОВ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ



Рисунок 8 – Амплитудно-частотная характеристика каркаса для ускорений



Рисунок 9 – Влияние демпферов на АЧХ по перемещениям



Рисунок 10 – Влияние демпферов на АЧХ по ускорениям

Анализ амплитудно-частотных характеристик каркаса показывает уменьшение абсолютных значений амплитуд колебаний их верхнего этажа при добавлении в систему инерционного демпфера. При этом достижение лучших результатов обеспечивается при применении демпфера по варианту 3.

Графики, показывающие влияние добавленных демпферов на АЧХ каркаса изображены на рисунках 9 и 10.

Таким образом, явление резонанса в сооружении практически сводится на нет: для всех трех вариантов демпфера ускорение верхнего этажа системы снижается на 60% по сравнению с недемпфированным сооружением. Однако, при вновь возникшей параллельной форме колебаний с собственной частотой выше периода целевой формы ускорения и перемещения несколько возрастают, но: перемещения для трех вариантов демпфера соответственно оказываются на 47%, 49% и 41% ниже, чем недемпфированном сооружении, а ускорения на 48%, 56% и 37% ниже соответственно. То есть, в этой параллельной низшей форме колебаний увеличение массы груза демпфера приводит к меньшему эффекту гашения, тогда как для высшей формы колебаний эффект напротив, приводит к большему гашению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Peter Irwin «Motion Criteria in High Rise Buildings» [Τεκcτ] / Irwin, Peter // RWDI Technotes. – 2010. – № 2c.

2. P. Jayachandran «Design of Tall Buildings, Preliminary Design and Optimization» [Текст] / Jayachandran, P. // International Conference on Tall Buildings and Industrial Structures: сб. статей. – PSG College of Technology, Coimbatore, India, 2003.

3. Свод правил: СП 20.13330.2011 «СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия» [Текст]: нормативно-технический материал. – М.: [б. и.], 2010. – 85 с.

4. RWDI Technotes, Issue Number 10: Damping Systems [Текст] / Rowan Williams Davies & Irwin Inc. (RWDI). – 2007.

5. Kourakis, Ioannis «Structural Systems and Tuned Mass Dampers of Super-Tall Buildings: Case Study of Taipei 101» [Текст] / Ioannis Kourakisio – Massachusetts Institute of Technology, 2007. – 69 c.

6. Динамический расчет зданий и сооружений [Текст] / М. Ф. Барштейн, В. А. Ильичев, Б. Г. Корнеев и др.; под ред. Б. Г. Корнеева, И. М. Рабиновича. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1984. – 303 с.

7. Европейский кодекс: EN 1991-1-4:2005+A1 Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions [Текст]: нормативнотехнический материал. – Brussels: CEN, 2010. – 149 с.

Жуков А.В. – магистрант ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, E-mail: minus.three.kelvin@gmail.com.

Кикоть А.А. – к.т.н., доцент кафедры «Строительные конструкции» ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова. E-mail: deltaing@mail.ru.