

УДК 624.042.8

АНАЛИЗ И ОГРАНИЧЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛЮДЕЙ

Ю.П. Назаров¹, В.Н. Симбиркин²

¹ *Директор ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко*

² *Главный инженер ЕВРОСОФТ, 109428 Москва, 2-я Институтская, 6, тел. (499) 1701084, simbirkin@eurosoft.ru*

Рассматривается проблема обеспечения динамической комфортности нахождения людей на трибунах стадионов и других сооружений, подвергающихся динамическим воздействиям вследствие согласованного движения большого числа людей. Приведены данные о проблемах, выявленных на ряде эксплуатируемых стадионов, и допустимым параметрам колебаний конструкций. Дано математическое описание динамического воздействия людей. Представлены расчетные параметры колебаний конструкций трибун стадионов, проектируемых в России, и меры, предложенные по ограничению колебаний.

Ключевые слова: трибуны, стадионы, собственные колебания, вынужденные колебания, динамическая комфортность.

ANALYSIS AND LIMITATION OF VIBRATIONS OF STRUCTURES UNDER HUMAN ACTION

Yu.P. Nazarov, V.N. Simbirkin

A problem of provision of adequate dynamic comfort for people on grandstands and other structures subjected to crowd-induced loadings is considered. Problems occurred in some stadia and permissible levels of human-induced vibrations of structures are reported. A mathematical formulation of the loading due to rhythmic crowd motions is given. Calculated vibration characteristics of several stadia designed in Russia, and structural arrangements reducing vibrations are presented.

Keywords: grandstands, stadiums, free vibrations, forced vibrations, dynamic comfort.

1. Суть проблемы

Динамические воздействия, обусловленные согласованными движениями большого числа людей, находящихся на трибунах и сценах культурно-массовых и спортивных сооружений, танцевальных залов и т.п., вызывают колебания конструкций, которые, в свою очередь, могут снижать комфортность пребывания людей в таких сооружениях.

В диссертационной работе [1] исследованы параметры вибрационного воздействия зрителей на конструкции трибун стадионов при проведении различных мероприятий, а также приведены данные по динамическим характеристикам конструкций трибун ряда построенных стадионов.

Согласно результатам мониторинга состояния эксплуатируемых объектов, а также специально поставленных экспериментов, толпа людей может оказывать значимое динамическое воздействие на трибуны в диапазоне частот от 1.5 до 3.3 Гц. Такой характер воздействия наблюдается при прыжках, топанье, танцах и других синхронных движениях людей. Наилучшая синхронность движений значительной группы людей была зафиксирована при частоте около 2 Гц. Особенно актуальным является динамическое воздействие зрителей на конструкции во время проведения поп- и рок-концертов, поскольку такт звучащей музыки обеспечивает наилучшую синхронность движений большого числа людей.

Низшие частоты колебаний конструкций трибун ряда существующих стадионов в свободном от людей состоянии, а также проблемы, вызванные динамическим воздействием зрителей на трибуны, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Данные из опыта эксплуатации ряда стадионов

Стадион	Низшие частоты свободных колебаний конструкций трибун, Гц	Зафиксированные проблемы и их устранение
«Маракана», Бразилия (150 тыс. зрит.)	4.6, 6.6, 17.0	Во время проведения футбольных матчей выявлены значительные ускорения и амплитуды колебаний железобетонных консольных балок трибун (вылет консолей 21 м), а также трещины в балках
«Фейеноорд», Голландия (61 тыс. зрит.)	2.3, 4.6, 5.8	Во время концертов замечены значительные вибрации верхних ярусов трибун, установлена автоматическая система, выключающая музыку при недопустимом уровне колебаний
«Морамби», Бразилия (80 тыс. зрит.)	2.2...4.0	От зрителей поступали жалобы на ощутимую вибрацию, после чего были установлены настраиваемые демпферы, смягчающие уровень колебаний
«Миллениум», г. Кардифф, Англия	Нет данных	Перед концертом устанавливают дополнительные стойки под трибуны

В статье [2] сообщается о проблемах, вызванных динамическим воздействием людей на трибунах стадиона в г. Кёльн-Мюнгерсдорф (Германия), и выполненных мерах по их устранению.

Низшая частота собственных колебаний железобетонных трибун стадиона составляла 3.9 Гц при свободных трибунах и 2.9 Гц при заполненных трибунах.

Во время проведения рок-концерта произошли недопустимые резонансные колебания трибун на кратной частоте 1.95 Гц (3.9/2). Для устранения проблемы колебаний применена временная, демонтируемая после концерта опорная конструкция, уменьшающая 14.32-метровые пролеты трибун в 2 раза. В результате этих мер собственная частота колебаний конструкций возросла до 6 Гц.

Авторы статьи [2] делают вывод о том, что наиболее надежное проектирование должно обеспечивать частоту собственных колебаний трибун стадионов и других сооружений не менее удвоенного значения преобладающей частоты воздействия.

Британские нормы BS 6399 [3] требуют при проектировании конструкций учитывать динамическое воздействие в диапазоне частот от 1.5 до 2.8 Гц. Динамический расчет на это воздействие требуется выполнять при наименьшей частоте собственных колебаний конструкции до 8.4 Гц в вертикальном направлении и до 4.0 Гц в горизонтальном направлении.

В руководстве [4] содержатся указания о том, что конструкции трибун удовлетворяют требованиям динамической комфортности и прочности при наименьшей частоте свободных вертикальных колебаний не менее 3.5 Гц, если сооружение используется исключительно для проведения спортивных мероприятий, и 6 Гц, если сооружение используется для проведения поп-концертов. Минимальная частота свободных колебаний трибун в горизонтальном направлении ограничивается величиной 3 Гц.

Таким образом, при проектировании конструкций трибун спортивно-зрелищных сооружений следует ограничивать колебания конструкций, обусловленные вибрационным воздействием зрителей.

В то же время отечественные нормативно-технические документы не содержат указаний по нормированию динамических нагрузок от людей и по допустимым параметрам (амплитудам перемещения, скорости, ускорения) вибрации конструкций трибун стадионов и других сооружений от таких воздействий, которые следует принимать при проектировании трибун. Действующие в России санитарные нормы СН 2.2.4/2.1.8.566-96 [5] распространяются на помещения производственных, жилых и общественных зданий, где возможны длительные вибрации, но не на трибуны стадионов и другие сооружения, где вибрации могут быть непродолжительными, и требования по их ограничению должны быть менее строгими. Поэтому в настоящей работе были использованы материалы зарубежных источников [1]-[4], [6].

2. Математическое описание воздействия

Наиболее значимое воздействие на трибуны зрители оказывают при движениях типа прыжков. Динамическое воздействие в этом случае будем описывать во времени как импульсивное воздействие, выражаемое следующей формулой:

$$p(t) = \begin{cases} p_{st} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{t_p} t\right), 0 \leq t \leq t_p \\ 0, t_p \leq t \leq T_p \end{cases}, \text{ где} \quad (1)$$

p_{st} – статический вес людской толпы; из расчета, что на 1 м^2 площади трибун синхронные прыжки совершают 2 человека, примем $p_{st} = 180 \text{ кг/м}^2$, что соответствует пониженному нормативному значению временной нагрузки на трибуны для стоящих зрителей по СНиП 2.01.07-85*;

T_p – период повторений воздействия; согласно экспериментальным данным из [1], величина T_p варьируется в пределах $[0.3 \dots 0.67] \text{ с}$;

t_p – длительность контакта; согласно [1] составляет $[0.25 \dots 0.67] T_p$.

Периодическое динамическое воздействие зрителей на трибуны можно представить в виде серии одинаковых импульсов (1), что при $t_p = T_p/2$ приводит к воздействию в виде положительной части синусоиды:

$$p(t) = \max \begin{cases} p_{st} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T_p} t\right) \\ 0 \end{cases}. \quad (2)$$

Графическая иллюстрация такого воздействия дана на рис. 1.

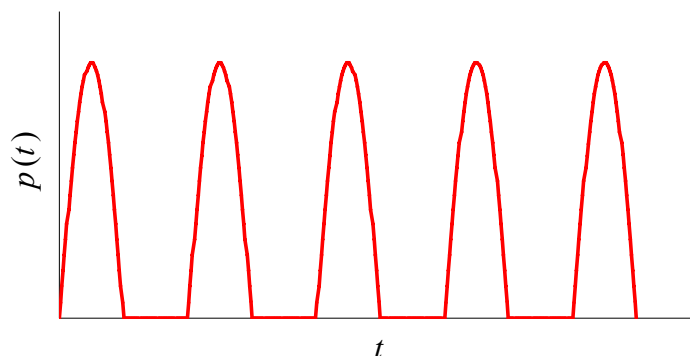
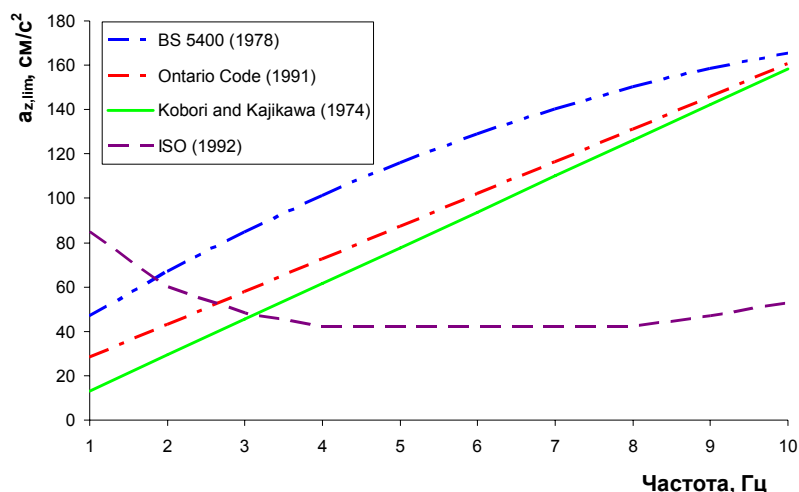


Рис. 1. Характер периодического воздействия людей на конструкции

3. Допустимые ускорения колебаний

В качестве основной величины, характеризующей ощущения людей при колебаниях, принимают, как правило, величину ускорений колебаний конструкций. В зарубежной литературе приводятся различные допустимые величины ускорений колебаний пешеходных мостов, трибун, перекрытий зданий и др. конструкций, при которых люди не испытывают значительного дискомфорта. На рис. 2 приведены допустимые величины ускорений вертикальных и горизонтальных колебаний конструкций в зависимости от частоты колебаний согласно различным нормам и исследованиям. Графики заимствованы из обзорной статьи [6].

а)



б)

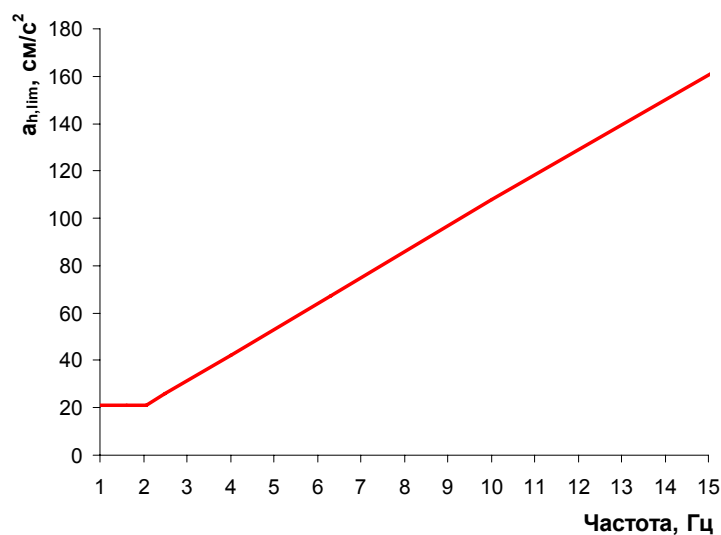


Рис. 2. Допускаемые величины ускорений вертикальных (а) и горизонтальных (б) колебаний

Следует заметить, что некоторые из критериев ограничения ускорений колебаний весьма жесткие. Так, «стандартная» для жилых и общественных зданий железобетонная монолитная плита толщиной 20 см перекрытия каркаса с сеткой колонн 6х6 м имеет частоту свободных колебаний около 8 Гц и наибольшую величину ускорений вертикальных колебаний при воздействии (2) 120 см/с². Из рис. 2,а видно, что при таких параметрах колебаний эта конструкция не удовлетворяет требованию динамической комфортности по одному из четырех представленных критериев. Однако учет в расчете

деформативности основания здания приводит к значительному снижению расчетных величин ускорений колебаний – в 2 раза и более.

4. Динамическая реакция недемпфированной одномассовой системы при синусоидальном импульсе

Для определения параметров колебаний конструкций при динамическом воздействии следует решить известную систему дифференциальных уравнений динамического равновесия [7]. В простейших случаях задачи, когда основной вклад в динамическую реакцию конструкций дает одна форма их собственных колебаний (а это случается достаточно часто), решение легко получить на основе рассмотрения динамической реакции одномассовой системы.

Если частота воздействия меньше частоты собственных колебаний системы, максимум динамической реакции системы приходится на фазу колебаний, происходящую во время действия динамической нагрузки. В этом случае, согласно [7], перемещение недемпфированной одномассовой системы при одиночном синусоидальном импульсе описывается во времени t так же, как и при гармоническом воздействии, следующей зависимостью:

$$y(t) = y_{st} \frac{1}{1-\beta^2} (\sin \varpi t - \beta \sin \omega t), \quad \text{где} \quad (3)$$

y_{st} – перемещение при статически приложенной нагрузке;

ϖ – круговая частота динамического воздействия;

ω – круговая частота собственных колебаний системы;

$\beta = \varpi/\omega$.

Скорость v и ускорение a колебаний выражаются соответственно как первая и вторая производные перемещения по времени:

$$v(t) = y_{st} \frac{1}{1-\beta^2} (\varpi \cos \varpi t - \beta \omega \cos \omega t), \quad (4)$$

$$a(t) = y_{st} \frac{1}{1-\beta^2} (\beta \omega^2 \sin \omega t - \varpi^2 \sin \varpi t). \quad (5)$$

Уравнения (3)-(5) описывают как стационарный, так и переходной режимы колебаний. Они могут быть использованы для аналитического решения рассматриваемой задачи.

5. Параметры колебаний трибун проектируемых стадионов

Рассмотрим задачу о колебаниях трибун Центрального стадиона на 40 тыс. зрительских мест, проектируемого для проведения в 2014 году Зимних олимпийских игр в г. Сочи. Расчетная конечно-элементная модель конструкций стадиона приведена на рис. 3.

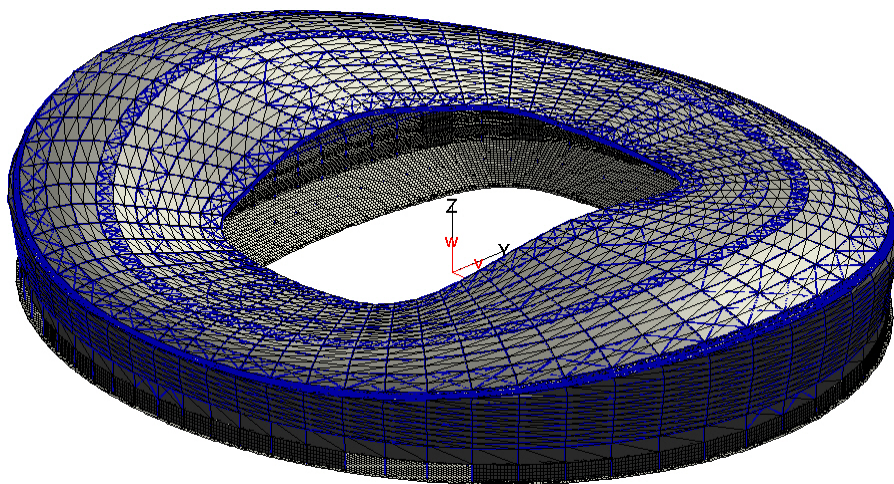


Рис. 3. Расчетная модель конструкций Центрального стадиона в г. Сочи для ПК STARK ES

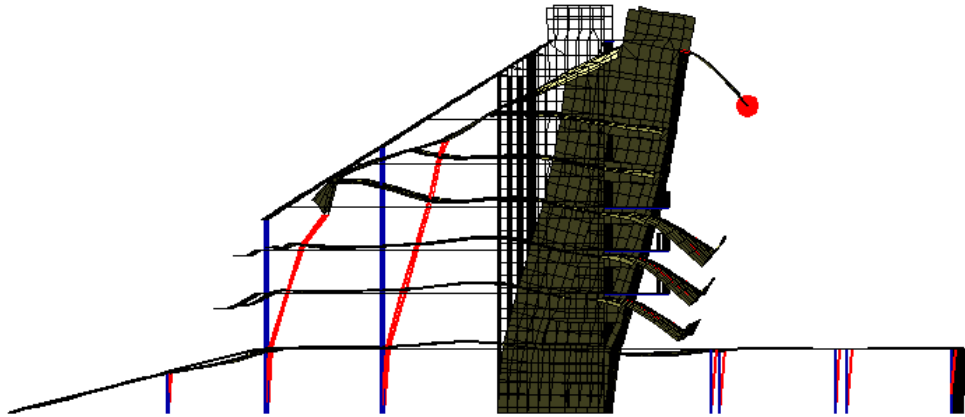
Основными низшими формами собственных колебаний конструкций свободных трибун стадиона, которые могут быть инициированы вертикальным динамическим воздействием зрителей на трибунах, являются:

- а) радиально-качательная форма колебаний верхних ярусов трибун (рис. 4,а) с частотой 3.8 Гц (периодом 0.26 с);
- б) вертикальные колебания нижних ярусов трибун (рис. 4,б) с частотой 5.8 Гц (периодом 0.17 с);
- в) вертикальные колебания консольных свесов трибун (рис. 4,в) с частотой 6.8 Гц (периодом 0.15 с).

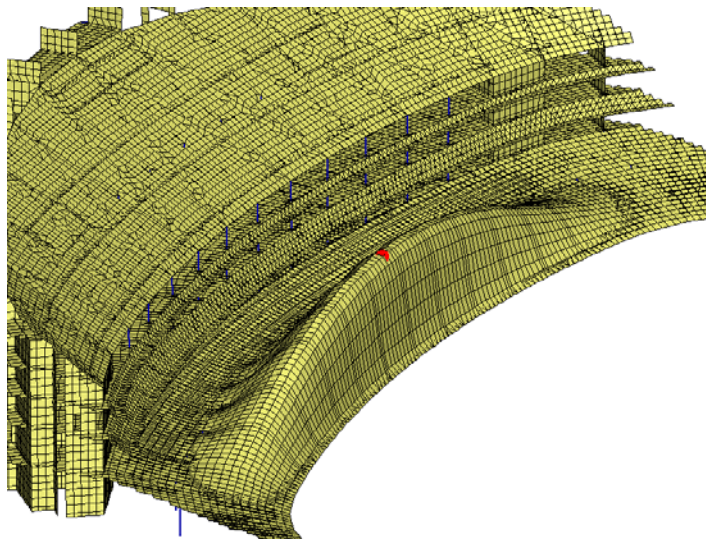
Решение задачи о вынужденных колебаниях конструкций трибун стадиона получено двумя численными методами, реализованными в широко известных программных комплексах (ПК) – **STARK ES** и **ЛИРА**. Используются метод разложения динамической реакции по собственным формам (ПК **STARK ES**) и метод прямого пошагового интегрирования системы дифференциальных уравнений по времени (ПК **ЛИРА**). В простейших случаях, когда был необходим учет всего одной формы собственных колебаний конструкций, численные решения сопоставлялись с аналитическим решением, полученным по формулам (3)-(5).

Результаты расчета в виде наибольших значений перемещений y , скоростей v и ускорений a колебаний верхней и нижней зон трибун при одиночном синусоидальном импульсе (1) продолжительностью $t_p = 0.5$ с, полученные разными методами и программными средствами, приведены в табл. 2.

а)



б)



в)

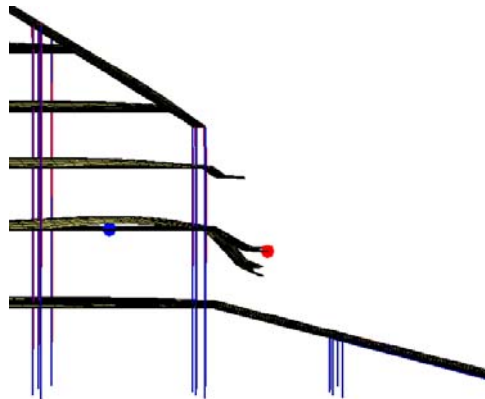


Рис. 4. Характерные низшие формы собственных колебаний конструкций трибун:
а) радиально-качательные колебания верхних ярусов трибун с частотой 3.8 Гц;
б) вертикальные колебания нижних ярусов трибун с частотой 5.8 Гц;
в) вертикальные колебания консольных свесов трибун с частотой 6.8 Гц.

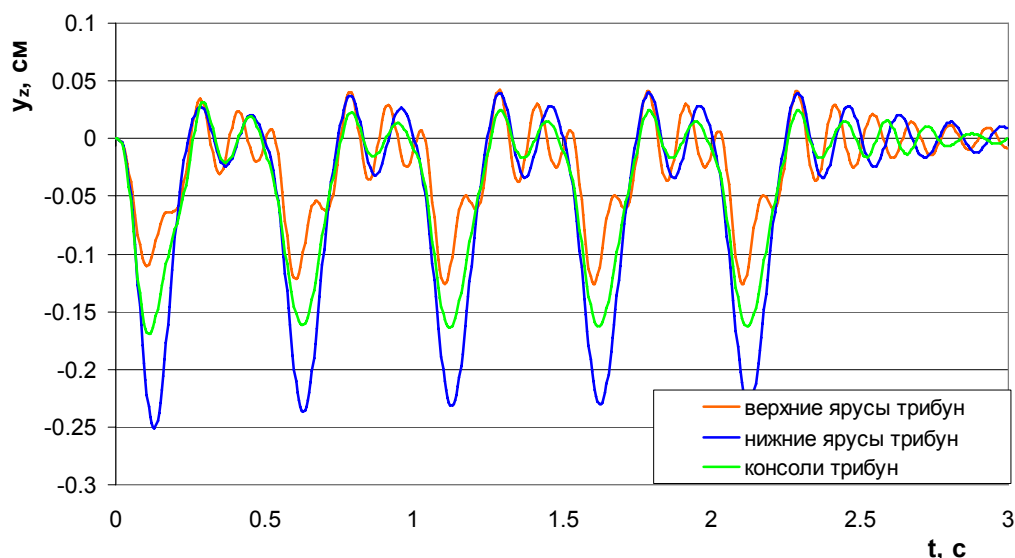
Таблица 2. Расчетные параметры колебаний трибун

Зона	Величина	Численное решение (ПК STARK ES, разложение по формам, 120 форм)		Численное решение (ПК ЛИРА, прямое интегрирование)	Аналитическое решение (ф-лы 3-5)
		демпфирование 5%	демпфирование отсутствует	демпфирование отсутствует	демпфирование отсутствует
Верхние ярусы трибун ($f_1 = 3.8$ Гц)	$y_{z,st}$, см	0.089			-
	y_x , см	0.05	0.05	0.05	-
	v_x , см/с	0.92	1.07	0.95	-
	a_x , см/с ²	36	44	41	-
	y_y , см	0	0	0.003	-
	v_y , см/с	0.06	0.08	0.06	-
	a_y , см/с ²	2.28	3.13	3.1	-
	y_z , см	0.11	0.12	0.12	-
	v_z , см/с	1.92	2.33	2.2	-
a_z , см/с ²	65	79	75	-	
Нижние ярусы трибун ($f_2 = 5.8$ Гц)	$y_{z,st}$, см	0.180			-
	y_x , см	0.06	0.07	0.06	-
	v_x , см/с	0.91	0.99	0.98	-
	a_x , см/с ²	27	32.3	31	-
	y_y , см	0	0	0.002	-
	v_y , см/с	0.03	0.03	0.03	-
	a_y , см/с ²	0.94	1.12	1.5	-
	y_z , см	0.25	0.26	0.26	0.27
	v_z , см/с	3.53	3.83	3.8	4.1
a_z , см/с ²	105	125	123	110	
Консольные свесы трибун ($f_3 = 6.8$ Гц)	$y_{z,st}$, см	0.137			-
	y_x , см	0.05	0.06	0.05	-
	v_x , см/с	0.88	0.94	0.95	-
	a_x , см/с ²	25	30	35	-
	y_y , см	0	0	0.003	-
	v_y , см/с	0.03	0.03	0.04	-
	a_y , см/с ²	0.8	0.96	2.9	-
	y_z , см	0.17	0.18	0.17	0.19
	v_z , см/с	2.8	3.02	2.9	3.1
a_z , см/с ²	80	95	98	97	

Данные табл. 2 свидетельствуют о хорошей согласованности результатов расчетов, полученных при нулевом демпфировании разными численными методами по разным программным комплексам и аналитически. Реальные строительные конструкции, безусловно, обладают свойством поглощения энергии колебаний, и демпфирование должно быть учтено в расчетах. Для железобетонных конструкций, согласно справочным данным (например, [8]), демпфирование можно принять равным 5% от критического (т.е. коэффициент неупругого сопротивления $\gamma=0.1$, логарифмический декремент колебаний $\delta=0.31$). Сопоставив данные из табл. 2, можно видеть, что учет 5-процентного демпфирования приводит к уменьшению амплитуды перемещений на 0...16%, скоростей – на 0...25%, ускорений – на 15...27%.

Графики изменения во времени вертикальных составляющих перемещений y_z и ускорений a_z колебаний конструкций трибун при периодическом воздействии в виде серии из пяти одинаковых импульсов с частотой повторения 2 Гц, полученные по STARK ES с 5-процентным демпфированием, приведены на рис. 5.

а)



б)

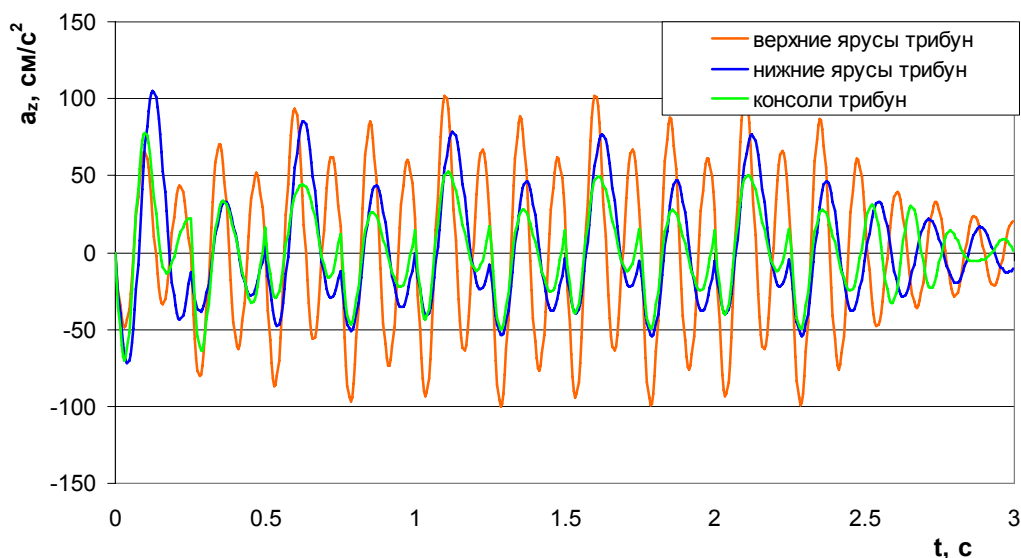


Рис. 5. Графики во времени перемещений y_z (а) и ускорений a_z (б) колебаний конструкций трибун при периодическом импульсивном воздействии

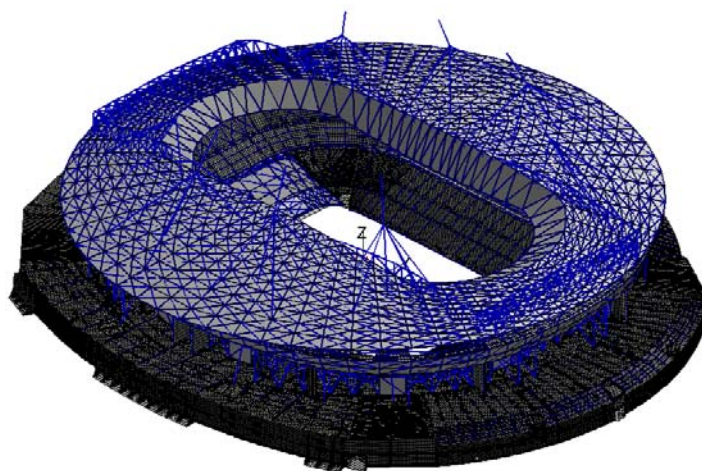
Из полученных результатов следует, что амплитудные величины динамических перемещений (до 2.5 мм) значительно ниже предельных перемещений, установленных в СНиП 2.01.07-85*.

Наибольшие расчетные величины вертикальных и горизонтальных ускорений колебаний трибун стадиона оказались достаточно высокими и равными 105 см/с^2 и 36 см/с^2 соответственно. Эти значения превышают допустимые величины ускорений по наиболее строгим критериям. Очевидно, что динамическое воздействие зрителей на трибуны может иметь частоту, несколько превышающую принятую в вышеприведенных расчетах величину в 2 Гц, т.е. более близкую к частоте свободных колебаний трибун и, соответственно, динамическая реакция конструкций трибун может быть более высокой. Поэтому рекомендовано увеличить высоту сечения балок трибун на 20 см, приняв полную высоту сечения балок равной 80 см. В этом случае частота свободных колебаний нижней зоны трибун возрастет с 5.8 до 6.9 Гц, и расчетные ускорения колебаний трибун снизятся на 11%.

Также следует заметить, что наибольшее значение коэффициента динамичности, равного отношению динамического перемещения y_z к статическому перемещению $y_{z,st}$, согласно расчету составило $0.25/0.180=1.39$ для нижней зоны трибун. Следовательно, эквивалентная статическая нагрузка на трибуны составила $1.39*180 \text{ кг/м}^2=250 \text{ кг/м}^2$. Это значение меньше величины статической равномерно-распределенной нагрузки 500 кг/м^2 , принятой при проектировании трибун в соответствии со СНиП 2.01.07-85*. Поэтому динамическое воздействие зрителей на конструкцию трибун не может привести к повреждению несущих конструкций трибун, рассчитанных на восприятие полной проектной нагрузки интенсивностью 500 кг/м^2 .

Проблема динамической комфортности нахождения людей на трибунах была решена также при проектировании на стадионе «Проект» уникального для России футбольного стадиона на 62 тыс. мест на Крестовском острове в г. Санкт-Петербурге и Большой ледовой арены для хоккея с шайбой на 12 тыс. мест в г. Сочи (рис. 6).

а)



б)

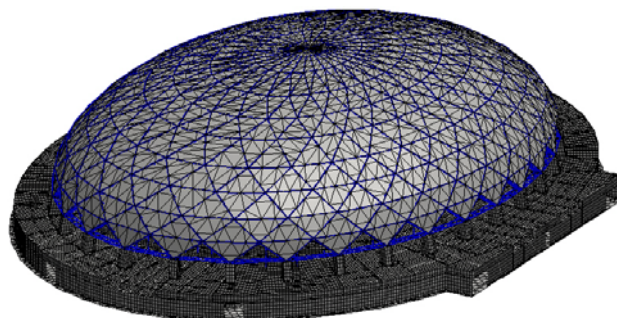


Рис. 6. Расчетные модели конструкций стадиона в г. Санкт-Петербурге (а) и большой ледовой арены в г. Сочи (б)

Так, с целью повышения динамической комфортности зрителей на трибунах стадиона в Санкт-Петербурге потребовалось существенно усилить изначально принятую стальную несущую конструкцию трибун, имевшую частоту свободных колебаний около 2 Гц в горизонтальном направлении и 3.5 Гц в вертикальном направлении без учета деформативности расположенных под трибунами железобетонных конструкций и основания сооружения. Под консольные свесы трибун были подведены дополнительные железобетонные опоры, а также установлены дополнительные вертикальные диафрагмы и связи жесткости трибун.

Литература

1. J.H. Sim. Human-Structure Interaction In Cantilever Grandstands// Ph.D. Thesis, University of Oxford, 2006.
2. J. Eibl, R. Roesch. Scwingungsprobleme in einem Fussballstadion// Bauingenieur 65 (1990), S. 307-311.
3. BS 6399-1:1996. Code of practice for dead and imposed loads. – London: British Standards Institution (BSI), 2002.
4. Dynamic performance requirements for permanent grandstands subject to crowd action. Interim guidance on assessment and design. – London: The Institution of Structural Engineers, 2001. – 22 pp.
5. СН 2.2.4/2.1.8.566-96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий. – М.: Минздрав России, 1997.
6. Živanović, S., Pavić, A. and Reynolds, P. Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: a literature review. Journal of Sound and Vibration, Vol. 279, No. 1-2, 2005, pp. 1-74.
7. Клаф Р., Пензиен Дж. Динамика сооружений. – М.: Стройиздат, 1979. – 320 с.
8. Инструкция по расчету несущих конструкций промышленных зданий и сооружений на динамические нагрузки. – М.: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко Госстроя СССР, 1970. – 288 с.