



УДК 725.8

Р.В. Шипилов – аспирант, ассистент

А.З. Манапов – кандидат технических наук, доцент

Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КазГАСУ)

Е.С. Перикова – кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ)

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА КОНСТРУКЦИИ ТРИБУН СПОРТИВНЫХ СООРУЖЕНИЙ

АННОТАЦИЯ

Статья описывает примеры и влияние динамических нагрузок на консольные конструкции трибун спортивных сооружений, создаваемые ритмичными действиями зрителей во время проведения различных массовых мероприятий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Динамические нагрузки, конструкции, трибуны, безопасность, проектирование, спортивные сооружения.

R. V. Shipilov – post-graduate student, assistant

A. Z. Manapov – candidate of technical sciences, associate professor

Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)

E. S. Perikova – candidate of technical sciences, senior staff scientist

Kazan State Energy University (KSPU)

THE ANALYSIS OF POSSIBLE DYNAMIC LOADS ON STAND STRUCTURES OF SPORTS FACILITIES

ABSTRACT

The article describes the examples and influence of dynamic loads on console design stands of sport facilities; which are created by rhythmical actions of spectators during mass performances.

KEYWORDS: Dynamic loads, structures, stands, safety, design, sport facilities.

Введение

В последние годы динамическая характеристика конструкций стадионов была выдвинута на первый план как область, требующая специального рассмотрения. Это продиктовано возросшим интересом к стадионам для использования их в качестве площадок для проведения мероприятий культурно-бытового назначения, влекущих ритмичные действия аудитории. Кроме того, совершенствование расчетов современных конструкций стадионов вызвано желанием достигнуть лучших точек обзора, свободных от помех (например, колонн), обеспечить максимальную вместимость зрителей для конструкций консольных ярусов, минимизировать массивность конструкций и использовать легкие виды каркасов. Учет вышеизложенных требований приводит к увеличению длины пролетов современных конструкций трибун, которые более восприимчивы к вибрации, чем варианты традиционных конструкций.

Руководство по расчету конструкций под действием динамической деятельности человека было разработано сравнительно недавно.

В литературных источниках встречается не много описанных случаев моментов вибраций, которые вызывают серьезное беспокойство, в известных условиях, потенциал для чрезмерной вибрации присутствует во многих конструкциях существующих стадионов.

Цель данной работы состоит в том, чтобы описать природу динамических нагрузок и реакций и дать представление о том, как проектировать или управлять проблемными местами в конструкциях, чтобы смягчить риск чрезмерной вибрации.

Вибрация вообще не должна влиять на безопасность конструкции, поэтому главная задача при проектировании заключается в том, чтобы минимизировать это влияние на саму конструкцию и впоследствии не вызвать дискомфорт или тревогу аудитории.

Динамические воздействия, произведенные группами людей, зависят в большей степени от типа произведенного действия и степени координации

участников. Понимание различных человеческих действий, которые могут возникнуть во время событий на стадионе, является главным критерием в оценке потенциальной вибрационной реакции конструкции на происходящее.

Есть два основных типа человеческого динамического воздействия. Первый – это пропорциональное количество толпы может создать внезапное совместное единое действие (такое как вставание при забивании гола). Такой тип действия произведет переходные вибрации, но они быстро затухают и вообще не являются серьезным опасением. Второй тип связан с повторяющимися одновременными действиями толпы, такими как: прыжки, раскачивания или колебания за единый промежуток времени зачастую в ответ на музыкальный ритм. В этом случае, если частота колебаний близка к собственной частоте конструкций, вибрация может создать цикл колебаний, приводя к появлению резонанса [1]. Частоты выражаются в колебаниях в секунду или в герцах (Гц).

Повторные динамические воздействия, такие прыжки или колебания толпы, могут быть с успехом рассмотрены, как сумма многих гармонических составляющих. Сила гармоничности меняется в зависимости от времени по синусоиде. Комплекс повторяющихся силовых воздействий может быть представлен как сумма множества точек синусоиды с собственной величиной и фазой кратных основной частоте форсирования. Первая гармоника – точка силы, действующая в базовом коэффициенте повторившегося действия; вторая гармоника в удвоенном базовом коэффициенте, третья гармоника в трехкратном и так далее. Эти гармонические силы иногда выражаются как «Коэффициенты Динамической Нагрузки (DLFs)», определенные как величина гармонической силы, разделенной на вес человека или группы людей, вовлеченных в действие. Коэффициент динамической нагрузки 0,5 означает, что амплитуда динамического усилия в данной частоте равна половине веса людей, производящих эту амплитуду [4].

Если конструкция приведена в движение, скажем, ударом, последующая -вибрация будет различна в каждой точке конструкции. Однако, анализ движений покажет, что частоты вибрации не распределены непрерывно, но содержат несколько дискретных значений. Если компонент движения исследовать отдельно на каждой частоте, то каждый одиночный частотный компонент имеет свое собственное пространственное распределение или вибрационную «форму модальности», которая может быть описана относительным отклонением (или скоростью или ускорением) в каждой точке конструкции на той частоте. Эти частоты свободного колебания и формы называют режимами собственных колебаний конструкции [5]. Существующие конструкции имеют

бесконечное число модальностей, но человеческие действия могут обычно сгенерировать только несколько модальностей естественной низкой частоты [2].

Вибрационная реакция конструкции к непрерывным повторенным динамическим воздействиям зависит от отношения -частоты силы воздействия к собственной модальной частоте конструкции. Если частота силы будет намного ниже, чем модальность воздействия, то величина циклического отклонения модальности будет близка величине значения пика силы, примененной статически. Если -частота силы -намного выше, чем модальность воздействия, реакция ограничена механической инерцией конструкции, и циклическая амплитуда отклонения будет меньше, чем статическое значение пика силы [3]. Однако, если частота силы близко к собственной частоте модальности, тогда произойдет резонанс, в котором динамические отклонения набирают более высокую амплитуду цикл за циклом, чем прогиб от статической нагрузки, и намного выше, если эти две частоты очень близки, частота затухания очень низкая. Рис. 1 показывает отношение прогиба от динамической нагрузки к прогибу от статической нагрузки как функцию частотного отношения (частота воздействия/ собственная частота) [7].

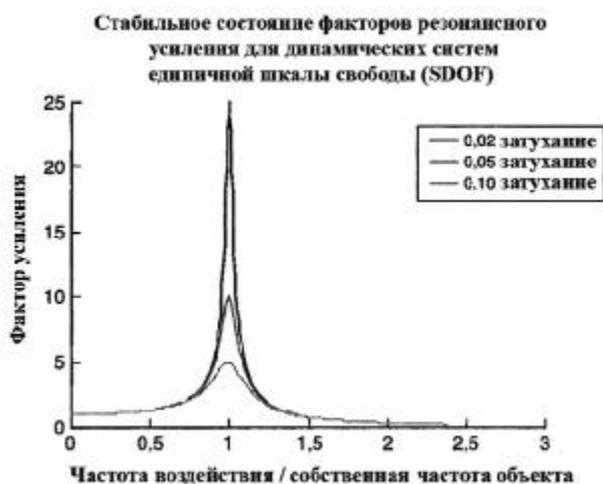


Рис. 1. Кривая резонансного усиления

Если частота непрерывной гармонической силы воздействия равна собственной модальной частоте, тогда динамический коэффициент усиления – $1/(2e)$, где e – коэффициент затухания. Затухание колебаний стальных конструкций стадиона низкое (находится в области от 0,01 до 0,02), и, таким образом, динамическое усиление реакции может быть между 25 и 50 [11]. Поэтому большое динамическое усиление может следовать из воздействия близкого к собственной частоте.

Есть множество человеческих действий, которые производят повторяемые вертикальные воздействия.



Прыжки – действие, производящее самое сильное ритмическое вертикальное воздействие, также более низкие степени воздействия связаны с колебаниями, топотом и действиями сидящей толпы.

На практике некоторые индивиды могут прыгать в пределах до 3,5 или 4 Гц, в то время как для больших групп людей при хорошей координации трудно подскочить в частотах выше приблизительно 2,75 Гц. Поэтому полное динамическое усилие от действия толпы не увеличивается линейно с участием числа людей [6].

Существует небольшое количество данных, доступных для определения других форм воздействия. Предложения в рис. 2 разработаны по результатам ограниченных измерений. Они могут использоваться по отношению к небольшим группам [7].

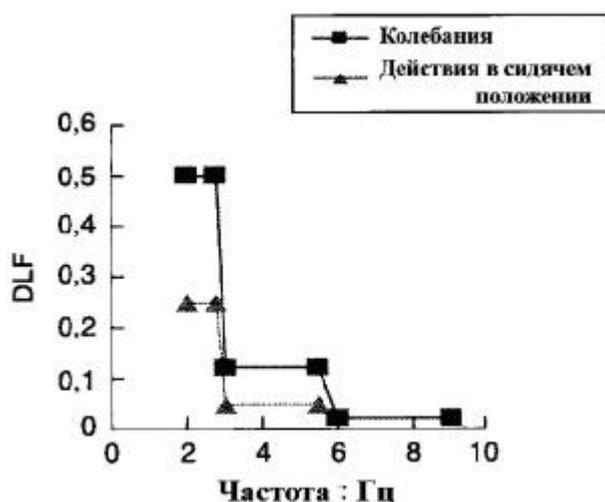


Рис. 2. DLFs для других вертикальных воздействий

Сценарии расчета

Различные типы явлений приведут к различным действиям аудитории и динамическим нагрузкам. В стадии проектирования должны быть выявлены соответствующие худшие сценарии. Самый затруднительный вариант тот, где большая часть аудитории может участвовать в подпрыгиваниях, а трибуна вступает в адекватную реакцию при этом условии. Подобное может соответствовать любому типу мероприятий. Для этого требуется собственная вертикальная частота выше, чем 6 Гц [9].

Достигнуть в расчете собственных частот выше 6 Гц почти невозможно, и большинство существующих стадионов не достигают этого частотного уровня. Например, некоторые стадионы никогда, возможно, не испытывают воздействие от прыжков толпы, и поэтому допустим расчет для меньших сил воздействия. Если концерты организовываются относительно редко, тогда на основании анализа нескольких прошедших мероприятий возможно оценить ожидаемые действия толпы.

В литературе информация по боковым динамическим воздействиям от индивидуумов и длинами толпы очень ограничена. Колебания из стороны в сторону являются самым распространенным результатом поперечной нагрузки. Доступные измерения показывают в разумной совместимости оба фактора воздействия раскачивания в горизонтальной плоскости – характерной частоты и гармонической амплитуды. Для целей расчета предложена полоса частот от 0,5 до 1,5 Гц.

Коэффициенты динамической нагрузки для небольших групп людей, выведенных из анализа Фурье измеряемых сил, представлены в таблице 1 [4]. Эти значения очень консервативны для больших групп, так как для соотношения людей в толпе характерно колебаться в противоположном направлении к источнику, аннулируя при этом часть потенциальной силы воздействия. Существенные соотношения силы возможны только в первой гармонике.

Циклические действия «вперед-назад», производимые людьми, являются не значительными и не рассматриваются в расчете. Однако, для консольных трибун воздействие модальности «вперед-назад» может стимулировать воздействие вертикальных сил, где низкочастотная модальность трибун содержит и вертикальные, и горизонтальные компоненты в своей форме.

Определение собственных частот

Основываясь на вышесказанном, ясно, что собственные частоты конструкции – это основные параметры в оценке динамической характеристики. Конструкции трибун в основном имеют нерегулярную конструктивную форму, и метод вычисления собственных частот должен это учитывать. Возможно оценить собственные частоты на основе вычислений с использованием унифицированных аналитических

Таблица 1

Факторы динамических нагрузок, применимые к раскачиваниям

Направление раскачиваний	Частотный диапазон: Гц.	Фактор динамической нагрузки (1-я гармоника)
Влево – вправо	0,5 – 1,5	0,25
Вперед – назад	0,5 – 1,5	0,05



формулы или с использованием метода конечных элементов на ЭВМ в двухмерной или трехмерной постановке. В последнем случае возможно рассмотрение отдельных узлов, например, узлов сопряжений балок трибун. С целью оценки, рекомендации собственной частоты – могут быть взяты как для разгруженной конструкции. В некоторых случаях гибкость фундамента может значительно сократить собственные частоты. Это необходимо указать. -Неконструктивные элементы могут прибавить существенную массу и жесткость к трибунам. В этом случае модель должна включать всю постоянную массу.

Последние исследования в лабораториях и на существующих конструкциях подтвердили, что присутствие неподвижных людей может значительно изменить динамические свойства трибун. Неподвижная толпа может обеспечить уменьшение собственных частот, увеличение модальной массы и существенное увеличение затухания колебаний [10].

Для существующих конструкций вычисление собственных частот может быть дополнено натурными испытаниями. Простые испытания, такие как ударные испытания опорных участков или регистрация окружающей вибрации, могут открыть существующие ключевые частоты, но не смогут опознать модальные формы или модальные массы. Кроме того, испытания опорных участков могут быть недостаточно мощными, чтобы воздействовать на глобальные модальности трибуны, и, конечно, не затронут воздействия боковых сил. Поэтому такие простые испытания должны использоваться в сочетании с конечным анализом элемента, чтобы гарантировать правильную интерпретацию [2]. Полное модальное испытание, в котором и сила воздействия, и динамические характеристики измерены в совокупности точек, может снабдить более полным обоснованием аналитических прогнозов и быть особенно ценным, когда неконструктивные элементы вносят существенную часть в жесткость конструкции.

Оценка, основанная на собственной частоте

Цель достижения максимальной собственной частоты состоит в том, чтобы гарантировать, что недопустимая резонансная реакция не сможет расти во время предусмотренного действия аудитории. Для

этого необходимо, чтобы -собственные частоты превысили самую высокую частоту, при которой аудитория осуществляет значительную силу возбуждения. Когда собственные частоты превышают значения, данные в таблице 2, конструкцию считают как приемлемую для установленной категории действия аудитории [2]. Цель для спортивного использования состоит в том, чтобы достигнуть собственной частоты вне диапазона, легковозбудимого основной гармоникой, а для эстрадных концертов – первых двух гармоник.

Также в некоторых случаях это может вести непосредственно к оценке модальности вибраций против этих критериев.

Влияние размещения людей на модальные свойства

Измерения на конструкциях трибун показали, что очевидные динамические свойства трибуны значительно различны, когда конструкция заполнена пассивными людьми и когда вся группа людей активно воздействует на конструкцию. Например, при синхронном подсакивании конструктивные свойства подвержены ущербу не значительно. Графики 3–5, выведенные из измерений, проделанных с помощью программы «Sache et al», показывают коэффициенты изменений для собственной частоты, модальной массы и дополнительного модального затухания, как функцию массы пассивных людей к конструктивной массе [10].

Приемлемые уровни вибрации

Критерии вибрации предназначены для определения уровней, ниже которых вряд ли будет существенный дискомфорт и/или тревога. Существуют зарегистрированные случаи, когда вертикальное ускорение трибун на концертах превысило 30% g без беспокойства для участников. Активные участники танцующей аудитории могут быть в достаточной степени невосприимчивы к вызванной ими вибрации, если вибрация передается к смежным площадям с несколькими улицами и гостевым областям. Однако, тот же самый уровень вибрации может быть воспринят как тревожный. Например, колебания в офисах становятся уже -неудовлетворительными выше приблизительно 0,5 % g , а для обеденных залов/ танцплощадок 2% g [12].

Таблица 2

Минимальная естественная частота, Гц

Категория	Вертикаль	Горизонталь
Спортивные мероприятия	3,5	1,75
Эстрадные концерты	7,0	1,75

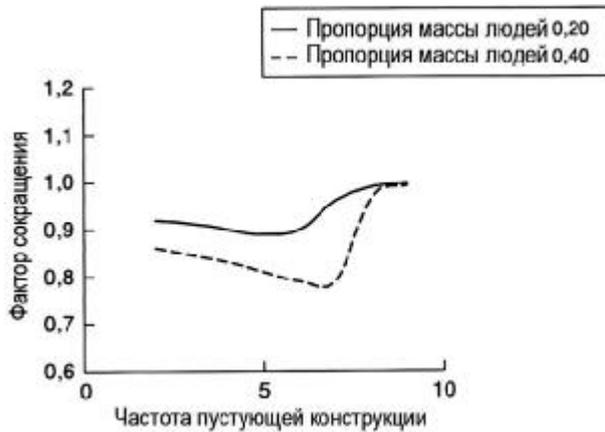


Рис. 3. Фактор сокращения

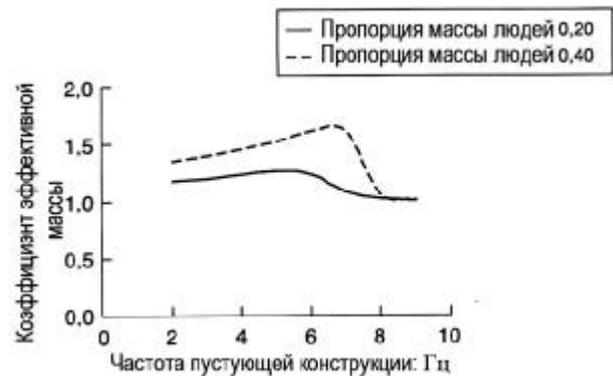


Рис. 4. Коэффициент эффективной массы

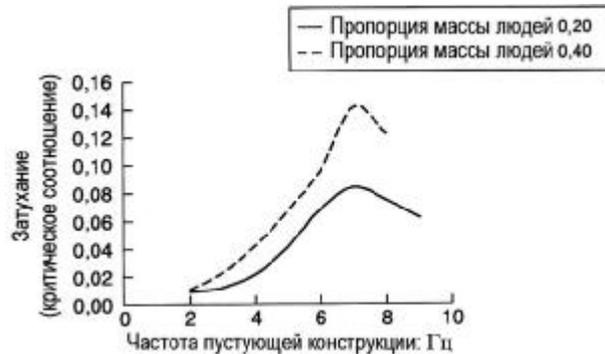


Рис. 5. Затухание в пустующей конструкции

Было предложено, чтобы вертикальная амплитуда ускорения яруса была ограничена 30% g под серьезными типами воздействия аудитории. Рекомендованная максимальная амплитуда вертикального отклонения 10 мм. Это призвано уменьшить человеческие риски под ярусом подверженной видимой величиной вибрации. Этот предел более важен, чем 30% критерий ускорения g для частот ниже 2,7 Гц [12].

Вертикальная вибрация на общих площадках и гостевых областях должна быть ограничена 2% g [12].

Люди более чувствительны к горизонтальным вибрациям, нежели к вертикальным. Для горизонтальных предложено, чтобы пиковое ускорение не превышало 6% g [12].

Управление вибрацией

Если собственные частоты восприимчивых модальностей превышают приблизительно 7 Гц в вертикальном направлении и 1,75 Гц в горизонтали, тогда не должно быть никаких реальных опасений. Придание жесткости конструкции для достижения более высоких собственных частот, возможно, не достижимо

в пределах архитектурных ограничений современных трибун, а проектные вычисления необходимого типа конструкций могут указать риск чрезмерной вибрации. На практике чрезмерная вибрация возникнет только тогда, если будет интенсивное воздействие аудитории по коэффициенту колебаний близких к собственной частоте трибуны, а вероятность выполнения обоих условий одновременно будет мала. Поэтому в большинстве случаев, вибрация вряд ли будет воспринята как нечто тревожное и есть только небольшой шанс, возникновения чрезмерной вибрации. Существует достаточно методов, которые могут использоваться для управления вибрационными воздействиями и которые могут быть востребованы только для проведения определенных мероприятий: использование дополнительных временных или демонтирующихся опор для интенсивных воздействий; обеспечение амортизаторами колебаний; сохранение нескольких первых рядов мест (консольных ярусов) пустыми, когда ожидается интенсивное воздействие на конструкции; обеспечение контроля действий аудитории; отключение звуковой системы, если колебания превышают предопределенный уровень [8].



Также можно отметить, что и инженерия конструкций, и методы контроля помещений и оборудования могут быть приняты отдельно или вместе. Вероятно, что во время проведения культурно-массовых мероприятий могут возникать проблемы, и общее понимание типов воздействий, которые вызывает аудитория, может быть получено из опыта ранее проведенных мероприятий.

Литература

1. СЕВ, Bulletin d'information no. 209, 'Vibration problems in structures - practical guidelines', 1991.
 2. BS6399 Part 1 'Code of practice for dead and imposed loads', BSI, 1996.
 3. Scottish Office and Dept of National Heritage: 'Guide to Safety at Sport Grounds', 1997.
 4. 'Dynamic performance requirements for permanent grandstands subject to crowd action - Interim guidance on assessment and design', Institution of Structural Engineers, 2001.
 5. Pernica, G., *Dynamic Load Factors for Pedestrian Movements and Rhythmic Exercises*, CAAC, 1990.
 6. Ellis, B. R. and Ji, T., *On the Loads Produced by Crowds Jumping on Floors*, EuroDyn, 2002.
 7. Allen, D. E., 'Building Vibration from Human Activities', *ACI Concrete International: Design and Construction*. Vol 12, No. 6, 1990.
 8. Dickie, J. F. and Gibbs, S. J., 'Temporary seating assemblies'.
 9. Ellis, B. R. and Ji, T., 'Human-structure interactions in vertical vibrations', *Proc. Inst. Civil. Eng. Structures and Buildings*, 1997.
 10. Sachse, Pavic and Reynolds, 'The influence of a group of humans on modal properties of a structure' EURO-DYN, 2002.
 11. Clough, R. W. and Penzien, J., *Dynamics of Structures*, 2nd Edition, McGraw Hill, 1993.
- Kasperski, M., *Safety assessment of stadia in regards to human induced vibrations*, Safer solutions in sports and leisure, ICE 5th Apr. 2002.