

ВИБРОКОЛЕБАНИЯ КОЛОКОЛЬНИ ПРИ КОЛОКОЛЬНОМ ЗВОНЕ

А.В. Адушкин, А.И. Гончаров, В.И. Куликов

В работе приведены результаты исследования виброколебаний колокольни, которые возбуждаются при звоне многотонных колоколов. Получена зависимость амплитуды изгибных колебаний от массы колокола и от числа ударов. Обсуждается негативное влияние вибровоздействия звонов на конструкцию колокольни и устойчивость грунтов в ее основании.

Введение

В связи с возрождением ансамбля колоколов Свято-Троицкой Сергиевой Лавры в первом ярусе колокольни (рис. 1.) были размещены вновь отлитые тяжелые колокола Первенец, Благовестник и Царь-колокол, массы которых приведены в табл. 1. Звон этих колоколов существенно изменил уровень вибронагрузок на колокольню.

Таблица 1

Амплитуда горизонтальных колебаний

Колокол	Масса колоколов, тонн	Макс. скорость колебаний, мм/с	Макс. смещение, мм
Первенец	27	0,44	0,06
Благовест	33	0,80	0,12
Царь-колокол	72	1,67	0,26
Все колокола	132	2,50	0,37

Известно, что вибронагрузки оказывают негативное воздействие на сооружения. Они могут вызывать накопление пластических деформаций и привести к усталостному разрушению сооружений. Вибрационное воздействие на грунт в основании сооружения может привести к осадкам фундамента. Поэтому по инициативе Патриаршего архитектурно-реставрационного центра были проведены исследования характера колебаний колокольни при звонах в тяжелые колокола.

Методика измерений

Вибрации характеризуются амплитудой колебаний и спектральным составом. Задача получения параметров колебаний решалась путем регистрации скоростей колебаний на четырех высотных уровнях колокольни. Эти уровни и их высоты приведены в табл. 2. На рис. 1 стрелками показаны эти высотные отметки.

Амплитуды колебаний на различных высотных отметках

Уровень колокольни	Высотная отметка, м	Максимальная скорость колебаний Юг-Север, мм/с	Максимальное смещение Юг-Север, мм	Частота колебаний, Гц
Крыльцо	0	0,030	0,003	1,10
Гульбище	13,6	0,140	0,020	1,11
Часовой ярус	47	0,800	0,120	1,11
корона	71	1,600	0,230	1,11

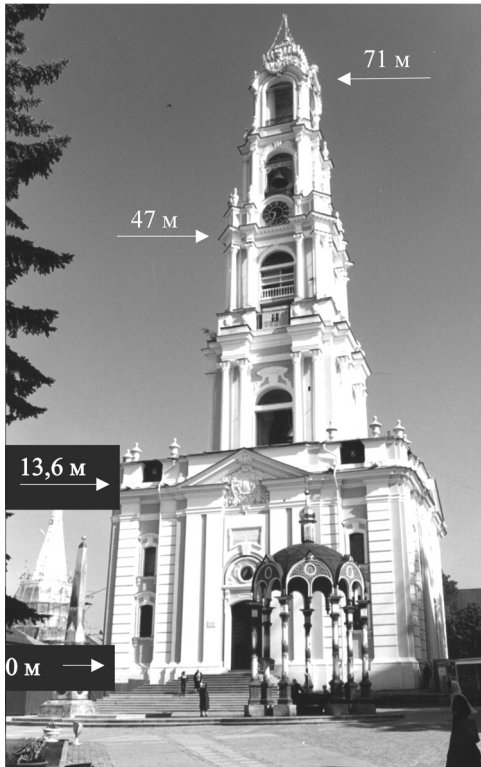


Рис. 1. Южный фасад колокольни

В качестве датчиков были использованы магнито-электрические сейсмоприемники СМ-3КВЭ. На каждом уровне устанавливалось по три сейсмоприемника, один для регистрации вертикальных колебаний, два других для регистрации горизонтальных компонент в направлениях Юг-Север и Запад-Восток. Сигналы со всех 12-ти сейсмоприемников при помощи четырнадцатиразрядного АЦП записывались на один регистратор-ноутбук. Исходные регистрограммы – скорости колебаний. По ним рассчитывались амплитудные спектры Фурье. Далее вычислялся спектр смещений, и путем обратного преобразования Фурье получали регистрограммы смещений.

Результаты измерений

Остановимся на колебаниях колокольни при звоне в Царь-колокол. Для иллюстрации на рис. 2 показаны регистрограммы скорости колебаний часового яруса колокольни, верх-

няя – вертикальные колебания, средняя – горизонтальные по направлению Ю-С и нижняя – по направлению З-В. По осям отложено время в секундах и скорость колебаний в мм/с. При каждом ударе языка в юбку колокола через систему подвеса колокола и через балку подвеса на колокольню передается импульс от удара языка и от вибрации звучащего колокола. Эти импульсы возбуждают упругие волны, которые распространяются по кладке стен вверх и вниз и вызывают колебания колокольни. Для велосиграмм на рис. 2 были рассчитаны амплитудные спектры Фурье, которые приведены на рис. 3

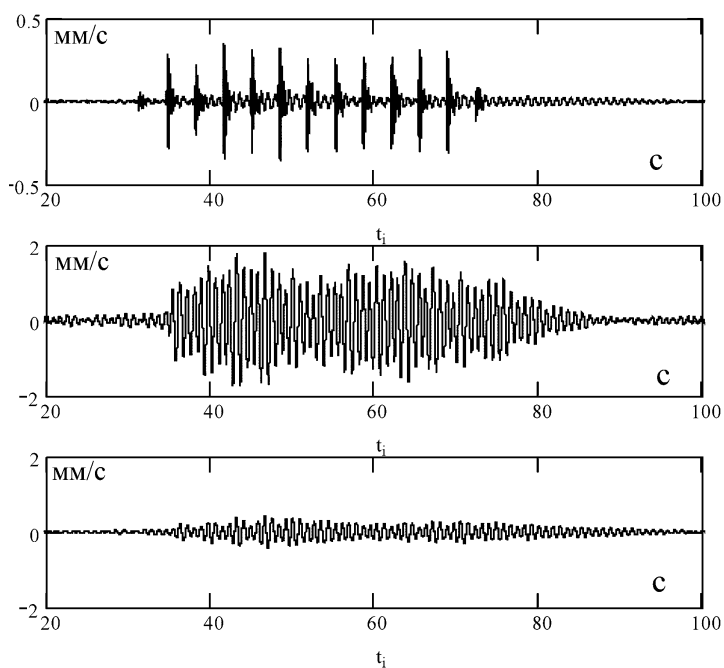


Рис. 2. Велосигramмы колебаний часового яруса колокольни при звонах Царь-колокола

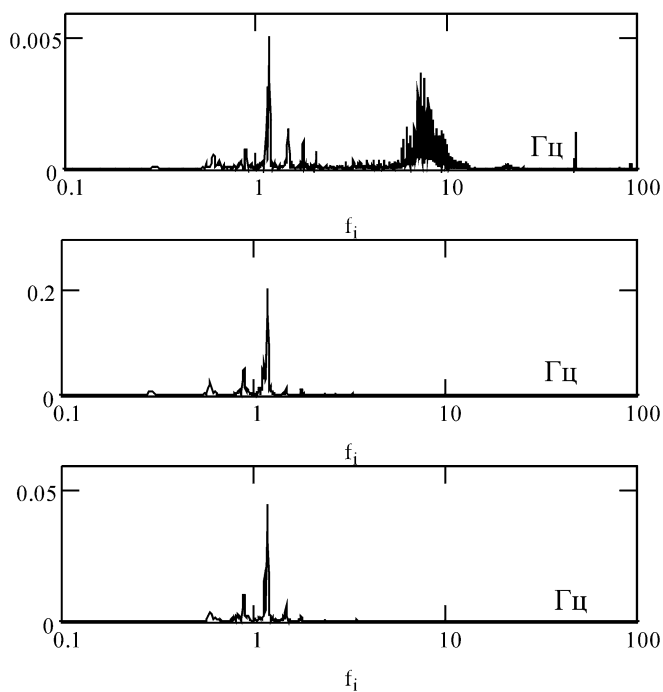


Рис. 3. Амплитудный спектр Фурье велосигramм колебаний часового яруса колокольни при звоне Царь-колокола

Из рис. 2 и 3 видно, что амплитуда вертикальных колебаний оказывается небольшой, максимальная скорость колебаний около 0,3 мм/с, максимальное смещение около 0,01 мм. Характерная частота колебаний около 7,5 Гц и обусловлена временем пробега упругой волны по стенам колокольни от основания до короны. Длительность колебаний от каждого удара менее 2 с и потому при звонах на регистраграммах различим каждый удар языка.

Амплитуды горизонтальных колебаний колокольни существенно больше, чем вертикальных. Из рис. 2 и 3 видно, что амплитуда скорости горизонтальных колебаний часового яруса в направлении Ю-С достигает величины 1,67 мм/с, амплитуда смещений – 0,26 мм, причем колебания монохроматичные с частотой 1,1 Гц. Анализ колебаний колокольни при ветровых нагрузках показал, что эта частота является собственной частотой изгибных колебаний колокольни.

По регистрограммам смещений в направлениях Ю-С и З-В была построена траектория горизонтального движения точки часового яруса при звоне в Царь-колокол, которая приведена на рис. 4. Из рисунка видно, что горизонтальные колебания колокольни поляризованы в направлении Ю-С, причем поляризация совпадает с плоскостью качания языка при звонах.

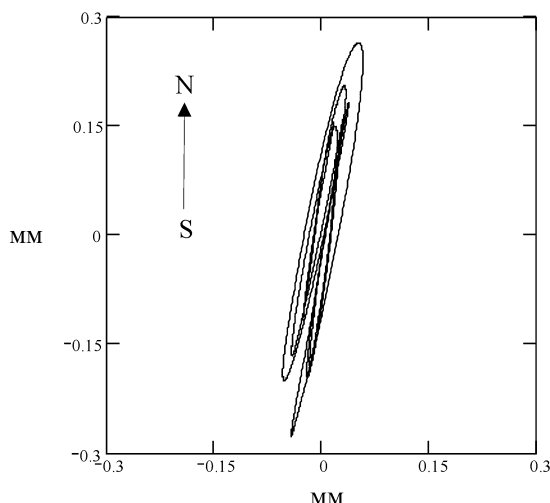


Рис. 4. Траектория движения точки часового яруса при звоне Царь-колокола

На всех высотных уровнях колокольни горизонтальные колебания происходят синфазно и с одинаковой частотой. Это иллюстрирует рис. 5, на котором приведены смещения короны (точечная линия), часового яруса (тонкая линия) и гульбища (жирная линия) при ударах в колокол Благовестник. В спектрах колебаний присутствует только один максимум с частотой 1,1 Гц. Очевидно, это частота собственных изгибных колебаний колокольни. Именно поэтому спектры колебаний одинаковы для звонов в любой колокол. Отсутствие в спектрах дополнительных спектральных максимумов с кратными частотами означает, что колебания колокольни одномодовые, простейшие.

Из рис. 5 видно, что амплитуда горизонтальных колебаний зависит от высоты уровня, на котором установлены сейсмоприемники. В таблице 2 приведены максимальные скорости колебаний, максимальные смещения и значения частоты спектрального максимума для горизонтальных колебаний в направлении Ю-С, полу-

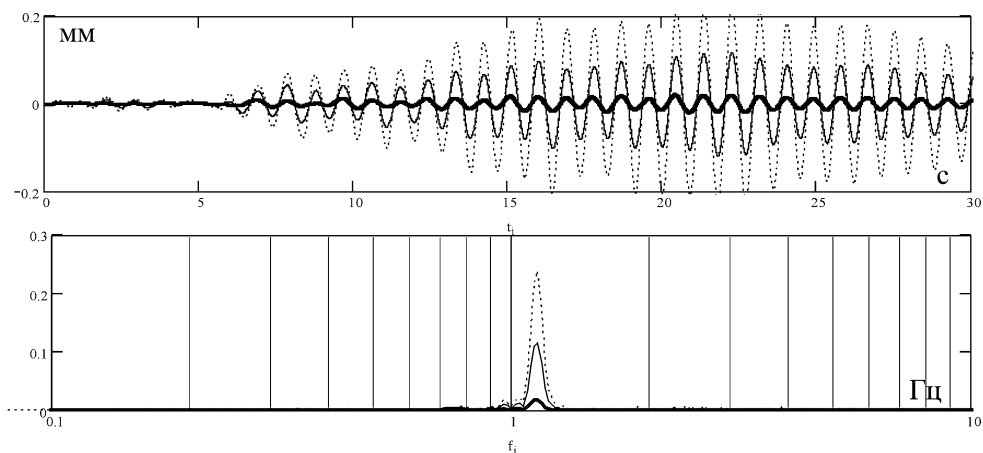


Рис. 5. Горизонтальные колебания и спектр короны (точечная линия), часового яруса (тонкая линия) и гульбища (жирная линия) при звоне колокола Благовест

ченные на различных уровнях колокольни при звоне в колокол Благовестник. По этим данным на рис. 6 была построена зависимость амплитуды колебаний от высотной отметки. Полученные натурные данные могут быть описаны параболической зависимостью:

$$y = 0,003 + 0,73 \cdot 10^{-3} \cdot h + 3,6 \cdot 10^{-5} \cdot h^2$$

где y – смещение в мм, h – высота в м. Параболическая зависимость подтверждает изгибный характер колебаний.

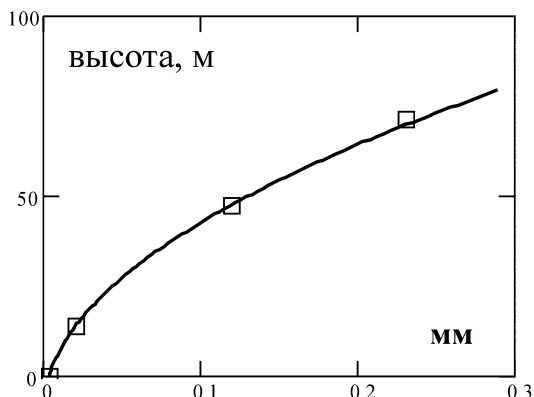


Рис. 6. Зависимость максимальных смещений от высоты при звоне колокола Благовест

Из рис. 2 видно, что при звонах в колокол (удары языка в оба края) амплитуда горизонтальных колебаний нарастает с увеличением числа ударов и выходит на «насыщение» при 11–12 ударах. Амплитуда скорости колебаний и амплитуда смещений при многократных ударах примерно в 3,5 раза больше, чем при однократном

ударе. Эффект резонансного раскачивания колокольни при многократных ударах не наблюдается, так как частоты качания языков и частота собственных изгибных колебаний колокольни отличаются существенно. Например, для Царь-колокола период следования ударов 3,5 с (верхняя регистрограмма на рис. 2), а период горизонтальных колебаний колокольни 0,9 с (частота 1,1 Гц, см. рис. 3). И хотя каждый удар языка передает колокольне дополнительную энергию, из-за низкой добротности колокольни как маятника, колебания затухают, что и приводит к эффекту «насыщения». Для колокольни актуальны звоны (многократные удары), а не отдельные удары в колокол, поэтому в этой работе обсуждаются амплитуды при звонах, т.е. при многократных ударах.

Очевидно, амплитуда горизонтальных колебаний колокольни зависит от массы языка. Литейщики православных колоколов строго следовали традиции: между массой языка и колокола должна быть пропорция 1:25. Это соотношение было выверено практикой эксплуатации колоколов. (При большей массе языка у колокола нередко появлялись трещины в юбке, при меньшей массе язык выбивал ундертоны низкого уровня звучания.) Отсюда следует, что можно строить зависимость амплитуды колебаний не от массы языка, а от массы колокола. При звонах в каждый из тяжелых колоколов (языки при исследовании раскачивались в направлении Ю-С) были измерены максимальные скорости горизонтальных колебаний и смещений часового яруса, которые приведены в табл. 2. По этим данным на рис. 7 построена зависимость амплитуды смещений колокольни от массы колокола, которая оказалась линейной.

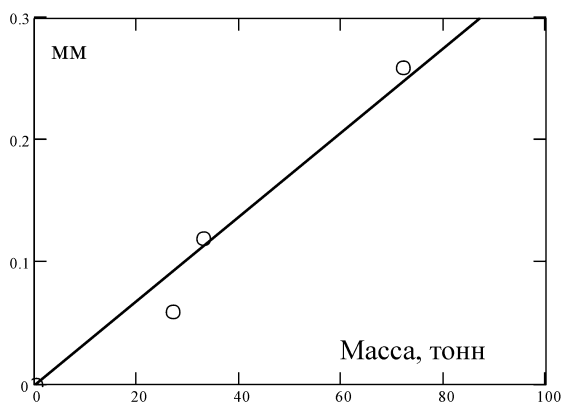


Рис. 7. Зависимость максимального смещения часового яруса от массы колокола

При наиболее значимых православных праздниках звоны могут производиться во все тяжелые колокола одновременно. При этом происходит суперпозиция колебаний, возбуждаемых каждым из колоколов. Как показали исследования, результаты которых приведены в последней строке табл. 2, амплитуда колебаний в этом случае больше, чем от каждого из колоколов в отдельности, но меньше суммы амплитуд. Эти амплитуды также меньше амплитуды, которую можно получить из экстраполяции зависимости на рис. 7, для эквивалентного по массе суммарного колокола весом 132 тонны. Это объясняется тем, что периоды качаний языков у тяжелых колоколов различные по величине и удары следуют несинхронно.

Оценим динамические нагрузки на колокольню при колокольном звоне с точки зрения известных нормативных документов. Согласно табл. 2, максимальное сме-

щение на часовом ярусе составляет 0,37 мм. Так как горизонтальные перемещения при колебаниях характеризуют изгиб оси колокольни, то с учетом высотной отметки часового яруса – 47 м, относительный изгиб стен составляет $-0,8 \cdot 10^{-5}$. Согласно Инструкции ЦНИИСКА [1] динамические нагрузки на строительные конструкции следует учитывать, если относительные изгибы превышают $2 \cdot 10^{-5}$. Отсюда можно заключить, что нынешний уровень изгибных колебаний колокольни при звонах не вызывает опасений для сохранности сооружения.

Принятый недавно ГОСТ «Вибрация и удар» [5] устанавливает предельно-допустимые скорости колебаний основания сооружений при импульсных воздействиях, к которым можно отнести и удары в колокол. Эти значения существенно превышают зарегистрированные скорости колебаний основания колокольни при звонах.

Вибровоздействие звонов может ослабить несущую способность грунтов в основании колокольни. Известно, что длительные вибронагрузки на грунты могут привести к его необратимым деформациям, которые будут постепенно накапливаться и могут достичь значительных величин. Эти деформации могут привести к неравномерным осадкам фундамента, что явится причиной деформации элементов конструкций сооружения, их повреждения и разрушения.

Для оценки осадок можно привлечь теорию виброползучести. Группа сотрудников под руководством академика В.А. Ильичева установила закономерность осадок грунта [2]:

$$S = \alpha \sqrt{t}$$

где S – осадки в мм, α – интенсивность виброползучести, t – время в минутах. В экспериментах В.А. Ильичева получено, что для песчаных грунтов при нагрузке на грунт около 2 кг/см^2 (такую нагрузку на грунт создает масса колокольни) α составляет $10^{-2} \div 10^{-1} \text{ мм}/\sqrt{\text{мин}}$. Отсюда следует, что за полчаса звонов осадки могут составить $0,5 \div 0,05 \text{ мм}$. При повторных воздействиях осадки возобновляются и суммируются. Опасность возникает не из-за значительных осадок, а их неравномерности из-за неоднородности грунта. Полученные оценки осадок показывают, что их нельзя игнорировать и целесообразно проводить ежегодный нивелировочный контроль за осадками фундамента или цоколя колокольни.

В литературе имеются многочисленные данные о негативном воздействии вибрации на грунты. По данным работы [3] при скоростях вибрации около 400 мкм/с осадки фундаментов зданий в слабых грунтах достигают 2 мм/год , а при уровне вибрации 1200 мкм/с возможны легкие повреждения старых зданий, отслаивание известковой краски, откалывание небольших кусков штукатурки. Анализ проведенных наблюдений позволил установить пороговое значение вибрационного воздействия на грунтовую среду по скорости колебаний 73 дБ или 225 мкм/с [4]. Превышение этого уровня требует осуществления специальных инженерных мероприятий для снижения негативных последствий вибрации, для сохранения несущей способности грунтов, надежной и безаварийной эксплуатации инженерных сооружений, обеспечения оптимальной жизнедеятельности людей.

При исследовании виброколебаний колокольни при звонах регистрации колебаний грунта в основании не проводилось, поэтому для оценок были рассмотрены скорости колебаний, зарегистрированные на наиболее низкой отметке, на крыльце колокольни (нулевая высотная отметка, которая в действительности на 2 м выше поверхности грунта). При звоне во все колокола было получена максимальная ско-

рость колебаний 0,1 мм/с или 66 дБ. Это ниже порога, но, как и оценка по виброползучести, показывает потенциальную опасность для несущей способности грунта виброколебаний, возбуждаемых звоном в тяжелые колокола.

Заключение

Таким образом, вибровоздействие звонов тяжелых колоколов может оказать негативное влияние только на несущую способность грунтов в основании колокольни. Но это негативное воздействие возможно лишь при неравномерных осадках, когда грунт существенно неоднороден по своим свойствам. И очень важно, что осадки фундамента – это растянутый на многие годы процесс, что позволяет вести за ними инструментальный контроль и принимать и осуществлять соответствующие инженерные решения по укреплению грунтов.

Как правило, колокольни, на которых размещены уникальные тяжелые колокола являются ценнейшими культовыми, историческими и архитектурными памятниками. Поэтому всегда желательно искать пути снижения вибронагрузок на колокольни. С этой целью на Храме Христа Спасителя тяжелые колокола были подвешены на упругих подвесках с демпфированием качания колоколов. При ударе языка юбка колокола имеет возможность перемещаться, что уменьшает импульс, передаваемый от удара на кладку стен. По другому пути пошли в Свято-Троицкой Сергиевой Лавре. Для Царь-колокола специалистами НПО им. Хруничева разработали язык с таким распределением масс (сбалансированный по моменту инерции), при котором существенно уменьшается импульс, передаваемый на балку подвеса и далее на колокольню. Измерения виброколебаний показали, что при сбалансированном языке амплитуда горизонтальных колебаний колокольни уменьшилась в 4 раза по сравнению с языком традиционной формы.

Литература

Инструкция по расчету несущих конструкций промышленных зданий и сооружений на динамические нагрузки, ЦНИИСК, изд. Литературы по строительству, 1970 г.

Ильичев В.А., Таранов В.Г., Хаин В.Л. О полевых испытаниях на виброползучесть с применением виброштампа оснований фундаментов турбоагрегатов. Основания, фундаменты и механика грунтов. 1986 г. С. 18–20.

Жигалин А.Д., Локишин Г.П. Формирование вибрационного поля в геологической среде. Инженерная геология. № 6, 1991 г., с. 110–119.

Савинов О.А. Современные конструкции фундаментов под машины и их расчет. М. Стройиздат, 1979 г. 279 с.

ГОСТ Р 52892-2007 Вибрация и удар. Изд. Стандартиформ, 2008 г.