

*С.И. Головки, д.т.н., профессор
А.С. Головки, к.т.н., с.н.с.
С.Н. Горлач, к.т.н., доцент
Ю.Г. Креймер, к.т.н., доцент
В.Ю. Ульянов, инженер*

ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры»

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗДАНИЙ В ДАЛЬНОМ ПОЛЕ ИСТОЧНИКА КОЛЕБАНИЙ

Приведены результаты динамической диагностики конструкций здания, находящегося в дальнем поле источника колебаний, результаты расчетов с разработкой технических решений по уменьшению уровня колебаний и обеспечению нормальной эксплуатации.

Ключевые слова: *процесс колебаний, уровень вибраций, виброскорость, виброускорение.*

*С.І. Головки, д.т.н., професор
О.С. Головки, к.т.н., с.н.с.
С.М. Горлач, к.т.н., доцент
Ю.Г. Креймер, к.т.н., доцент
В.Ю. Ульянов, інженер*

ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БУДІВЕЛЬ У ДАЛЬНОМУ ПОЛІ ДЖЕРЕЛА КОЛИВАНЬ

Наведено результати динамічної діагностики конструкції будівлі, що знаходиться у дальньому полі джерела коливань, результати розрахунків з розробленням технічних рішень щодо зменшення рівня коливань і забезпечення нормальної експлуатації.

Ключові слова: *процес коливань, рівень вібрацій, віброшвидкість, віброприскорення.*

*S. Golovko, ScD, Professor
A. Golovko, PhD
C. Gorchach, PhD, Associate Professor
Yu. Kreimer, PhD, Associate Professor
V. Ulianov, Engineer*

SHEI «Prydniprovs'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture»

INVESTIGATION OF BUILDING DYNAMIC CHARACTERISTICS IN DISTANT TRANSMITTER OF RIPPLING

The article presents the results of building dynamic diagnostics in distant transmitter of rippling, the results of engineering solution for the vibration level reduction and providing the normal operation.

Keywords: *vibration process, vibration level, vibrospeed, vibroacceleration.*

Введение. После строительства комплекса зданий на одном из металлургических комбинатов было установлено, что уровень колебаний междуэтажных перекрытий по величине среднеквадратической виброскорости превышал допустимую гигиеническую норму общих технологических вибраций. На стадии проектирования масштаб динамических воздействий со стороны существующего тяжелого металлургического оборудования, расположенного на большом расстоянии от проектируемых объектов, не был принят во внимание и не исследовался. Нарушение нормальных условий работы требовало принятия технических решений по определению и снижению уровня вибрации.

Обзор последних источников исследований и публикаций. Динамические колебания конструкций зданий и сооружений при их определенном уровне могут оказывать существенное влияние на работоспособность конструкций, ограничивать возможность эксплуатации рабочих мест, влиять на технологическое и точное оборудование. В условиях действующих предприятий при высокой насыщенности оборудованием, создающим вибрации, учет их интенсивности с оценками по вибрационным параметрам является достаточно важной инженерной задачей [1, 3, 4, 5], исследованной только для решения частных случаев. Динамические параметры зданий в дальнем поле источника колебаний изучены в недостаточном объеме.

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы. Специальные исследования вибрационного воздействия в дальнем поле источника вибраций на расстояниях 180 – 240 м от приемника практически не проводились. Представляет научный и практический интерес исследование колебаний приемника вибрации – здания с рамной конструктивной схемой, расположенного в зоне влияния пылеуловителей, создающих горизонтальные низкочастотные колебания, которые передаются по пескам средней плотности на значительные расстояния.

Постановка задачи. При прохождении волны в грунтах частота колебаний изменяется и может оказывать существенное влияние на конструкции зданий, наиболее чувствительными элементами которых являются перекрытия. Для того чтобы иметь обоснованные данные по уровню вибраций во всем диапазоне воспринимаемых динамических воздействий, необходимо экспериментально определить реальные динамические параметры, установить корреляционные связи с источником возмущений и конструктивно снизить уровень колебаний.

Основной материал и результаты. Экспериментальное определение динамических параметров перекрытий каркасного здания АБК выполнено с использованием виброметрического комплекса [3] и датчиков И 001 в комплекте с самописцами уровня ЭК 1Т-04 и ЭК 1Т-03 м (для регистрации смещений в диапазоне частот 1÷50 Гц, который позволяет зафиксировать характер процесса колебаний во времени и установить его природу). Колебания перекрытий возбуждались посредством разовых толчков дополнительными грузами, и измерялась низшая частота свободных колебаний f , а также продолжительность затухания для определения коэффициента демпфирования $\delta=2v/p$, (где v – демпфирование, p – угловая частота), существенно влияющего на уровень колебаний в околорезонансной зоне. Использование точных методов расчета в данном случае нецелесообразно, поскольку исходные данные имеют значительный разброс [4]. Угловая частота низшей формы колебаний составила 13,3 Гц и практически совпала с результатами эксперимента для перекрытий с сеткой колонн 6×6 м. Полученные данные позволили определить коэффициент динамичности K_1 при колебаниях для каждого из перекрытий, воспользовавшись известными из теории колебаний зависимостями [4] для простейшей расчетной схемы системы с одной степенью свободы в предположении малости колебаний. Использование K_1 позволяет ограничиться проведением измерений в точках интенсивной вибрации.

Измерения уровня вибраций в связи с вынужденными колебаниями здания при действии передаваемых по грунту возмущений в период работы пыльгерстанов проводились на фундаментах, колоннах 2 – 3-го этажа и междуэтажных перекрытиях 2-го и 3-го этажей здания с помощью виброметра-анализатора типа 795М-107В для определения среднеквадратичных значений виброскорости колебаний конструкций с последующим их частотным анализом методом быстрого преобразования Фурье и построением амплитудного спектра зафиксированных колебаний.

При анализе данных измерений выявлен широкий спектр колебаний, что характерно для динамических воздействий типа ударов, подобных процессам, происходящим при погружении свай сваебойными аппаратами, что дает основание использовать нормативную базу по проектированию и устройству свайных фундаментов в условиях реконструкции промышленных предприятий [3]. Можно отметить следующие характерные особенности, в частности при достаточно высоком уровне виброскорости (более 0,3 мм/с) на спектрах имеется четкий, резкий пик на доминантной частоте 11,3 Гц, характерный для резонансных явлений, когда происходит накопление энергии и «раскачивание» объекта.

Результаты измерений среднеквадратичной виброскорости колонн в трех направлениях показали, что диапазон величин вертикальных и горизонтально-поперечных колебаний соизмерим с соответствующими величинами колебаний грунта в шурфах и в основании фундаментов и не превышает допускаемых величин ни по одному из критериев [1]. Амплитудные спектры колебаний колонн показывают наличие низшей частоты около 7 Гц, характерной для горизонтально-поперечных колебаний здания как единого целого, а также более высокой частоты, близкой 11 Гц, равной доминантной частоте колебаний грунта в основании здания. Наряду с доминантной частотой зафиксированы колебания более широкого спектра как снизу этой частоты, так и сверху, что свидетельствует о взаимном влиянии на колебания колонн и перекрытий.

Оценка воздействия вибрации на конструкции здания с использованием отечественных норм показала, что, в соответствии с нормами [3], допустимое ускорение вертикальных колебаний фундаментов для зданий со II группой грунтов оснований, представленных мелкозернистыми маловлажными песками, при котором не происходят дополнительные деформации оснований, составляет 0,6 м/с² (600 мм/с²), что в 25 раз больше, чем максимальные, фактически полученные на фундаменте в шурфе, составившие 24 мм/с². Оценка механических напряжений в конструкции панелей перекрытий при колебаниях выполнена по пиковым значениям скорости, в соответствии с нормативными документами [2], которые при колебаниях на частоте, близкой к резонансной, могут быть рассчитаны по результатам измерений скорости и частоты в точках, где значение скорости максимальное. Сделан вывод, что по всем принятым нормативным критериям уровень вибрации строительных конструкций значительно меньше допустимых величин.

При оценке воздействия вибрации на людей использовано понятие общей вибрации [6], отнесенной к узкополосной среднечастотной вибрации (8 – 16 – 22 Гц) непостоянного характера. Гигиеническая оценка такой вибрации производится частотным (спектральным) анализом нормируемого параметра, а именно: интегральной оценкой по частоте нормируемого параметра и интегральной оценкой с учетом времени вибрационного воздействия по эквивалентному (по энергии) уровню нормируемого параметра. Оценка воздействия вибрации на людей внутри здания выполнена по соответствию нормативам стандартов безопасности труда [1], которые устанавливают скорректированные по частоте значения допустимой среднеквадратичной виброскорости или виброускорения. Для здания допустимая величина среднеквадратичной виброскорости в октавной полосе 16 Гц составляет 75 дБ, или 0,28 мм/с.

Массивы данных измерений уровня среднеквадратичной виброскорости в наиболее напряженной точке перекрытия 3-го этажа за рабочую смену составили от 0,4482 до 0,3694 мм/с с пиковыми значениями до 0,69 мм/с, что превышает нормативную величину 0,28 мм/с в 1,32 – 1,6 и 2,45 раза по пиковым значениям. Экспериментально установлено, что наименьшие значения виброскорости относятся к случаям работы одного пыльгерстана. Анализ диаграмм измерений показывает значительную неравномерность уровня вибраций во времени с отдельными кратковременными «выбросами» величины виброскорости, свидетельствует об отклонениях от нормального режима работы пыльгерстанов (дальнего источника колебаний). Устранение только лишь 9% таких вибраций повышенного уровня, вероятной причиной которых является нестабильность режима работы пыльгерстанов, обеспечило бы снижение среднеквадратичной виброскорости до приемлемой величины 0,32 мм/с, однако переоборудование машины является весьма сложной задачей с предполагаемым положительным результатом.

Полученный результат не отражает особенностей распространения волн в конкретных грунтах, но однозначно подтверждает, что уровень колебаний здания пропорционален уровню колебаний подошвы фундамента пыльгерстана. В процессе проведения измерений, синхронизированных с работой пыльгерстанов, установлено, что в отдельные периоды работы уровень колебаний конструкций здания АБК при работе пыльгерстана № 1 примерно в 3,5 раза выше, чем стана № 2, хотя расстояние от него больше всего на 17% (при прочих равных условиях). Это может свидетельствовать о возможных нарушениях режима работы оборудования стана № 1. Данные закономерности отмечены при исследовании пыльгерстанов рядом авторов на протяжении многолетних наблюдений [5].

Передаваемая через грунт вибрация сообщает конструкциям обследуемого здания колебания, параметры которых зависят от типа фундамента здания, состояния грунта в основании, расстояния до источника вибрации, состояния конструкций самого здания и ряда других факторов. Геологический состав грунта влияет на изменение частотного состава вибрации, передаваемой от источника. Полученные результаты показали, что преобладающие (доминирующие) частоты колебаний грунта лежат в диапазоне 11 – 18 Гц. Для данного состава грунта [3] частота в зависимости от плотности песка находится практически в том же диапазоне.

Результаты измерений уровня вибрации грунта показали также, что изменение виброскорости мало зависит от изменения расстояния до источника, т.е. здание АБК находится в дальнем поле источника. При этом большая часть вибрационной энергии передается зданию поверхностными (рэлеевскими) волнами и волнами отражения (Стоунли), возникающими на границе сред грунта различной плотности, и тем меньше влияют на него волны сжатия и сдвига. Частота собственных колебаний панелей перекрытий здания, по данным эксперимента, находится в том же диапазоне, что и частота колебаний грунта, т.е. в резонансной зоне. Это объясняет повышение уровня колебаний перекрытий по сравнению с уровнем колебаний колонн.

Метод виброзащиты здания экранирующими устройствами заключается во введении в грунтовой массив существенной неоднородности, обеспечивающей отражение волн, в том числе рэлеевских, распространяющихся от поверхностного или мелко заглубленного источника (глубина заложения фундаментов пыльгерстанов составляет 7,0 м). Для эффективного снижения колебаний глубина экранирующей траншеи Н должна быть приблизительно равна длине рэлеевской волны 8 – 20 м, а внутреннее пространство между стенками траншеи должно быть пустым или заполненным низкомодульным материалом, глубина траншеи соизмерима с отметкой уровня подземных вод на участке, составляющей 10 – 11 м от поверхности.

В практике имелся единичный опыт использования экранирующих устройств, реализованный в 70-х годах XX ст. при защите здания в г. Москве, однако при эксплуатации ее эффективность оказалась практически нулевой. Траншеи, вырытые на пути распространения вибрации от источника до объекта воздействия, обычно не решают проблему. Причиной служит большая длина волны. Как следствие, волна дифрагирует на дне и стенках траншеи без существенной потери энергии в анализируемом диапазоне частот. Чтобы реально ослабить передаваемую вибрацию, траншея должна быть достаточно глубокой, соответствующих размеров по периметру и перекрывать прямую видимость объекта воздействия из источника. Это позволяет в некоторой степени ослабить вибрацию, но только в области непосредственно за барьером. Зарубежные исследователи предлагают установку в виброзащитную траншею газонаполненных подушек вместе с системой управления давлением газа, что является дорогим проектным решением, параметры по гашению подбираются экспериментальным путем.

В условиях динамического воздействия наиболее устойчивы к вибрациям конструкции из монолитного железобетона, что обусловлено особенностями их динамической работы, испытывающие не «острые», а более «мягкие» резонансные явления. Наиболее приемлемой схемой здания в этом случае является каркас, эффективность которого повышается с увеличением толщины плит перекрытий и уменьшением сечений колонн, при наличии плитного фундамента, распределяющего колебания по площади и снижающего их, однако в данном случае эти мероприятия не были предусмотрены проектом.

Поскольку основной вклад в вибрацию перекрытий вносят собственные колебания на первой собственной частоте, одним из направлений снижения их уровня является демпфирование. Для снижения резонансных колебаний могут использоваться конструкционные материалы с высокими коэффициентами потерь, при которых колебания снижаются до 5 – 7 дБ, что можно реализовать только на проектной стадии. В части снижения уровня вибраций существующего здания масштабы колебаний грунтового основания в проекте были недооценены. В полной мере их влияние в виде колебаний перекрытий или шума стало заметным лишь в уже готовом здании.

Учитывая, что колебания перекрытий здания происходят в близком к резонансному режиму, и собственные частоты перекрытий незначительно превышают доминантную частоту возмущения 11,3 Гц, наиболее рациональным представляется уход от резонанса методом повышения собственной частоты за счет увеличения жесткости перекрытий (включая установку дополнительных стоек в центре пересечения диагоналей). Вторым вариантом может быть увеличение жесткости методом подводки и предварительного напряжения металлических балок с включением в работу с бетоном плит анкерами. При обеспечении совместной работы момент инерции сечения плиты может быть повышен и собственные частоты перекрытий практически на всех формах колебаний увеличиваются в 1,54 – 1,64 раза с выводом монолитных железобетонных плит в зарезонансную зону со снижением уровня вынужденных колебаний в 3 – 4 раза до допустимых санитарных норм. Выполненные экспериментальные исследования при установке дополнительных стоек в средней части пролетов плит подтвердили расчетные исследования. Дополнительно рассмотрена разновидность способа виброизоляции путем применения различных конструкций «плавающего пола». Работа этих конструкций имеет тот же принцип, что и работа зданий на виброизоляторах. Как показывает практика, при частоте настройки до 8 Гц «плавающий пол» в силу своей более простой схемы и точной настройки способен обеспечить нормальную эксплуатацию.

Выводы:

1. Уровень вибрации строительных конструкций в процессе работы источников динамических возмущений пильгерстанов, находящихся в дальнем поле, не оказывает негативного действия на прочность, надежность и устойчивость конструкций здания монолитной каркасной схемы в целом. Зафиксированные при длительных наблюдениях, а также расчетным путем параметры колебаний строительных конструкций значительно меньше предельнодопустимых величин и допускают нормальную эксплуатацию здания по проектному назначению.

2. Вследствие фактического уровня среднеквадратичной виброскорости части площадей здания необходимы мероприятия по уменьшению его до приемлемых величин, согласно требованиям санитарных норм.

3. Для уменьшения уровня колебаний отдельных помещений здания предложено усиление перекрытий и изменение частот собственных колебаний с выводом за резонансную зону по двум вариантам: установка на 1-м и 2-м этажах дополнительных легкомонтируемых колонн-стоек либо усиление перекрытий металлическими, предварительно напрягаемыми балками с включением в совместную работу с железобетонными перекрытиями. Для локального снижения вибрации рабочих мест предложено применение индивидуальных виброизолирующих подмостей.

4. Учитывая наличие непрерывных динамических воздействий на конструкции здания АБК при работе пильгерстанов, рекомендован мониторинг состояния строительных конструкций здания с периодичностью 1 раз в год.

Литература

1. ГОСТ 31191.2-2004 (ИСО 2631-2:2003). *Вибрация и удар. Измерение общей вибрации и оценка ее влияния на человека. Ч. 2. Вибрация внутри зданий (ИСО 2631-2:2003, MOD)*. – М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2008. – 7 с.
2. ГОСТ Р 52892-2007. *Вибрация и удар. Вибрация зданий. Измерение вибрации и оценка ее воздействия на конструкцию*. – М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2008. – 16 с.
3. *Проектирование и устройство свайных фундаментов и шпунтовых ограждений в условиях реконструкции промышленных предприятий и городской застройки. Ведомственные строительные нормы ВСН 490-87 Минмонтажспецстроя СССР*. – М., 1988. – 32 с.
4. Тимошенко, С.П. *Колебания в инженерном деле* / С.П. Тимошенко, Д.Х. Янг, У. Уивер; [пер. с англ. Э.И. Григолюка]. – М.: Машиностроение, 1985. – 472 с.
5. Большаков, В.И. *Особенности взаимодействия пневмогидравлических и гидромеханических систем тяжелых металлургических машин* / В.И. Большаков, И.Б. Листопадов, К.В. Коноваленко // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. тр. – Вып. 17*. – К.: Наукова думка, 2008. – С. 258 – 266.
6. *Санитарные нормы СН 2.2.4/2.1.8.566-96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий*. М., 1996. – 41 с.

Надійшла до редакції 11.12.2014

© С.І. Головка, О.С. Головка, С.М.Горлач, Ю.Г. Креймер, В.Ю.Ульянов