

УДК 691.33

Галиуллин Р.Р. – ассистент

E-mail: rinat.ceis.kazan@mail.ru

Изотов В.С. – доктор технических наук, профессор

E-mail: V_S_Izotov@mail.ru

Нуриева Д.М. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: danm_n@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗДАНИЙ С ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫМ КАРКАСОМ

АННОТАЦИЯ

Исследована зависимость спектра собственных частот монолитного железобетонного здания не только от жесткости и расположения основных несущих элементов каркаса, но и от жесткости второстепенных конструктивных элементов (наружных стен внутренних перегородок из штучных материалов), а также от податливости основания. Установлено, что возникновение повреждений и дефектов конструкций зданий в локальных зонах, величина которых несущественно снижает общую жесткость всего каркаса, практически не влияет на динамические параметры здания. Напротив, существенное снижение жесткости каркаса, связанное с повреждением несущих элементов в ответственных местах или появление дефектов, в результате которых возникает повсеместное снижение жесткости по всей высоте здания, может вызвать уменьшение собственных частот до 53 %.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: динамические характеристики зданий, жесткость конструкций, повреждения и дефекты.

Galiullin R.R. – assistant

Izotov V.S. – doctor of technical sciences, professor

Nurieva D.M. – candidate of technical sciences, associate professor

Kazan State University of Architecture and Engineering

NUMERICAL RESEARCHES OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF BUILDINGS WITH THE FERRO-CONCRETE SKELETON

ABSTRACT

Dependence of a spectrum of own frequencies of a building not only on rigidity and arrangement of the basic bearing elements of a skeleton, but also from rigidity of minor constructive elements (walls of internal partitions from piece materials), and also from a basis pliability is investigated. It is asurtained that occurrence of damages and defects of designs of buildings in local zones, the size of which insignificantly reduces the general rigidity of all skeleton, practically doesn't influence dynamic parameters of a building. On the contrary, essential decrease in rigidity of the skeleton, connected with damage bear elements in responsible places or occurrence of defects in which result arises general rigidity decrease on all height of a building, can cause reduction of own frequencies to 53 %.

KEYWORDS: dynamic characteristics of buildings, rigidity of designs, damages and defects.

Большинство современных методов расчета зданий и сооружений на сейсмические и ветровые воздействия базируются на резонансно-колебательной концепции, согласно которой предполагается, что наибольшие повреждения здание может получить в момент возникновения резонанса, когда частота вынуждающей нагрузки совпадает с частотой собственных колебаний здания. Здесь в качестве сейсмических и ветровых нагрузок принимаются инерционные силы, возникающие в здании вследствие нестационарных колебаний грунта или пульсаций ветра. Эти силы неотделимы от динамических характеристик самого сооружения, и поэтому при оценке реакции здания от их воздействия важное место уделяется решению собственной проблемы и определению частот и форм собственных колебаний сооружения.

Результаты расчета на собственные колебания также могут служить и для оценки общей жесткости конструкции, и характера распределения жесткостей в несущей системе. Например, при проектировании многоэтажных зданий получение первой низшей формы, в которой возникают существенные перекосы и закручивания относительно вертикальной оси здания, свидетельствует о неудачной расстановке вертикальных диафрагм или связей жесткости, что впоследствии может привести к недопустимым повреждениям здания. Особенно это актуально для сейсмических районов, поскольку сложное движение основания сооружения при землетрясении может инициировать возбуждение крутильных колебаний. Использование равномерного и симметричного распределения жесткостей здания в плане и, соответственно, равномерного распределения усилий между его элементами позволяет повысить его сопротивляемость динамическим воздействиям. При этом первые две формы колебаний должны характеризоваться возвратно-поступательными движениями. Таким образом, зная частотные характеристики здания, можно еще на этапе проектирования предусмотреть мероприятия по уменьшению динамических деформаций и усилий.

Исследование периодов и частот собственных колебаний зданий может быть важным и при неразрушающих методах контроля степени повреждения зданий и выявлении скрытых дефектов. Использование специальных систем, в состав которых входят датчики, устанавливаемые в определенных точках здания и соединенные кабелями с АЦП и ПК, оснащенным программным обеспечением для приема и анализа полученных от датчиков сейсмовибрационных сигналов, позволяет в натуральных условиях измерить частоты собственных колебаний здания. Степень повреждения здания определяется по результатам сравнения проектных (расчетных) значений динамических параметров с полученными экспериментально.

Для оценки адекватности расчетных моделей зданий их реальному поведению были проведены численные исследования спектра частот собственных колебаний 17-этажного здания жилого дома, расположенного по ул. Дубравная в Приволжском районе г. Казани. Расчеты проводились с помощью двух комплексов: Лира (Киев) и Stark_ES (Москва). Оба расчетных комплекса реализуют метод конечных элементов в форме метода перемещений и позволяют решать достаточно широкий спектр задач. Решение обобщенной задачи на собственные значения и в Stark_ES, и в Лире производится с использованием метода итераций подпространства [2, 3]. Результаты расчета были сравнены с результатами натуральных исследований, проведенных с использованием мобильного диагностического комплекса «Струна-3М» и Геосиг.

Для оценки влияния различных факторов на динамические характеристики здания рассматривались несколько стадий:

- а) I стадия – стадия строительства, когда возведено только 6 нижних этажей;
- б) II стадия – стадия строительства, когда здание почти достроено (возведено 16 этажей здания);
- в) III стадия – стадия эксплуатации здания.

На начальном этапе исследований был использован традиционный подход, принятый в практике проектирования многоэтажных зданий, который базируется на следующих предпосылках:

- грунтовое основание здания считается абсолютно жестким и недеформируемым;
- динамическая жесткость здания определяется только жесткостью основных несущих элементов каркаса, а влияние второстепенных элементов, таких как внутренние перегородки и наружные стены из штучных материалов, учитывается только путем загрузки каркаса соответствующей линейной нагрузкой. Как показал анализ результатов расчета, при таком подходе наблюдается существенное отклонение частот собственных колебаний каркаса, полученных численным путем, от экспериментальных. Так, для стадии III расчетом получены сравнительно низкие частоты. Программа ЛИРА дает отклонение до 52,85 %, программа Stark_ES – до 49,69 % (см. таблицу 1). Такое отклонение объясняется тем, что в расчетных моделях не были учтены работа грунтового основания, работа кирпичных перегородок и наружных стен. Кроме этого, оказывает влияние условность заданных временных нагрузок на перекрытия (150 кг/м^2). В реальности эти нагрузки могут существенно отличаться от расчетных. При всем этом, как видно из таблицы 1, наблюдается достаточно хорошая сходимость результатов, полученных в программах ЛИРА и Stark_ES. Различие составляет до 2,6 %.

Таблица 1

Направление	Частоты, Гц			
	Эксперимент	Лири	Stark_ES	Различие Лири-Stark
f_{x1}	1,07 Гц	0,70 Гц	0,7187 Гц	2,6 %
f_{y1}	1,17 Гц	0,78 Гц	0,7816 Гц	0,2 %
Отклонение численных значений от экспериментальных	–	-52,85 % (f_{x1}) -50,0 % (f_{y1})	48,88 % (f_{x1}) 49,69 % (f_{y1})	–
f_{x1} и f_{y1} – частоты при 1-ой форме собственных колебаний здания вдоль оси X и Y соответственно.				

На различных этапах строительства и эксплуатации здания влияние может оказывать как один вышеописанный фактор, так и все сразу. Поэтому в дальнейших исследованиях влияние каждого фактора оценивалось на разных стадиях. Так, оценка влияния свайного основания производилась на основе начального этапа строительства, когда присутствует только монолитная конструкция, включающая 6 нижних этажей будущего здания (стадия I). При введении в расчетную модель податливых связей, моделирующих работу реальных свай ($k = 56693$ кН/м), сходимость численных и экспериментальных частот составила 96-97,5 %. Дополнительные исследования динамических характеристик каркаса при различных параметрах жесткости свай показали, что с увеличением податливости основания происходит снижение частот собственных колебаний конструкции (см. таблицу 2).

Таблица 2

Направление	Частоты, Гц			
	эксперимент	при жесткости свай $k = 28350$ кН/м	при жесткости свай $k = 56693$ кН/м	при жесткости свай $k = 113386$ кН/м
f_{x1}	2,4 Гц	2,27 Гц	2,46 Гц	2,62 Гц
f_{y1}	2,6 Гц	2,30 Гц	2,50 Гц	2,71 Гц

Для оценки влияния на частотные характеристики здания работы наружных стен и перегородок из штучных материалов была рассмотрена последняя стадия строительства, когда возведено 16 из 17-и этажей здания, включая полы, внутренние перегородки и наружные стены из слоистой кладки (стадия II). Результаты расчетов и сравнение их с экспериментальными данными представлены в таблице 3. Из таблицы видно, что наилучшая сходимость численных и экспериментальных данных наблюдается при расчете каркаса с учетом одновременно податливости основания и работы второстепенных элементов (наружных стен и перегородок).

Таблица 3

Направление	Частоты, Гц			
	эксперимент	при жестком основании без учета работы стен и перегородок	при жестком основании с учетом работы стен и перегородок	при податливом основании с учетом работы стен и перегородок
f_{x1}	1,1 Гц	0,81 Гц	1,39 Гц	1,08 Гц
f_{y1}	1,2 Гц	0,87 Гц	1,55 Гц	1,22 Гц
Отклонение численных значений от экспериментальных	–	-35,8 % (f_{x1}) -37,93 % (f_{y1})	+26,36 % (f_{x1}) +29,17 % (f_{y1})	-1,85 % (f_{x1}) +1,67 % (f_{y1})

Влияние на частотные параметры здания временных нагрузок, действующих на перекрытия, рассматривалось на стадии эксплуатации здания (III). Необходимо отметить, что на момент проведения испытаний дом был заселен частично. Поскольку экспериментальные исследования каркаса проводились в летний период, в расчете снеговая нагрузка на покрытия также не учитывалась. Таким образом, оценивалось влияние на частотные характеристики здания только временных равномерно распределенных нагрузок на перекрытия. При этом было проведено три расчета при разных уровнях этой нагрузки:

1. $v = 30$ кг/м² (учитывается только длительная часть этой нагрузки) [1];

2. $\nu = 150 \text{ кг/м}^2$ (учитывается полное значение нагрузки, она имеет статус кратковременной);
3. $\nu = 300 \text{ кг/м}^2$ (рассматривается повышенный уровень нагрузки).

Результаты расчетов и сравнение их с экспериментальными данными представлены в таблице 4. Анализ результатов расчета показал, что сходимости численных значений частот собственных колебаний здания с экспериментальными значениями при учете только длительной части временной нагрузки от веса людей и оборудования (30 кг/м^2) достаточно высокая. Расхождение составляет не более 5,9 %. Чем выше интенсивность действующей нагрузки, тем ниже оказываются расчетные частоты.

Таблица 4

Направление	Частоты, Гц			
	эксперимент	при $\nu = 30 \text{ кг/м}^2$	при $\nu = 150 \text{ кг/м}^2$	при $\nu = 300 \text{ кг/м}^2$
f_{x1}	1,07 Гц	1,01 Гц	0,97 Гц	0,89 Гц
f_{y1}	1,17 Гц	1,16 Гц	1,12 Гц	1,02 Гц

В работе также было рассмотрено влияние податливости стыков, повреждений и остаточных деформаций в несущих элементах каркаса здания на его динамические параметры. Для этого было создано 3 модели 17-этажного здания. В первом случае в модели было произведено снижение жесткости локальных зон плиты перекрытия в уровне только первого этажа на 70 %. Во втором случае на уровне первого этажа из расчетной модели здания было исключено несколько несущих колонн в пределах зоны площадью 80 м^2 . В третьем случае была понижена в целом жесткость всего каркаса, путем введения к начальному модулю упругости бетона понижающих коэффициентов 0,6 и 0,3 для вертикальных и горизонтальных элементов соответственно. Результаты расчета представлены в таблице 5.

Таблица 5

Направление	Частоты, Гц			
	Расчетные начальные частоты, полученные без снижения жесткости каркаса	Случай 1 (снижены жесткости локальных участков плиты перекрытия)	Случай 2 (исключено несколько колонн 1-го этажа)	Случай 3 (снижена жесткость всего каркаса)
f_{x1}	1,01 Гц	1,01 Гц	0,76 Гц	0,69 Гц
f_{y1}	1,16 Гц	1,16 Гц	0,83 Гц	0,76 Гц
Отклонение от начальных значений	—	0 % (f_{x1}) 0 % (f_{y1})	-32,89 % (f_{x1}) -39,75 % (f_{y1})	-46,37 % (f_{x1}) -52,63 % (f_{y1})

Анализ результатов расчета показывает, что возникновение повреждений и дефектов конструкций зданий в локальных зонах, величина которых несущественно снижает общую жесткость всего каркаса (случай 1), практически не влияет на динамические параметры здания. Напротив, существенное снижение жесткости каркаса, связанное с повреждением несущих элементов в ответственных местах (случай 2) или появление дефектов, в результате которых возникает повсеместное снижение жесткости по всей высоте здания (случай 3), может вызвать уменьшение собственных частот до 53 %. Такое снижение, как правило, не приводит к внезапному обрушению конструкций. О возможности такого обрушения может свидетельствовать дальнейшее уменьшение частот собственных колебаний здания.

Общие выводы

1. Сравнительный анализ результатов расчета монолитного каркаса жилого дома на собственные колебания, полученные с использованием расчетных комплексов Лира и Stark_ES, показал, что при формировании абсолютно идентичных компьютерных пространственных моделей, оба комплекса дают идентичную качественную и количественную картину. Сходимость результатов составляет 94,6-99,8 % (расхождение 0,2-5,4 %).

2. Спектр собственных частот здания зависит не только от жесткости и расположения основных несущих элементов каркаса, но и от жесткости второстепенных конструктивных элементов (наружных стен внутренних перегородок из штучных материалов), а также от податливости основания. С учетом работы основания и кирпичных стен и перегородок сходимость результатов составляет 98,15-98,33 % (расхождение 1,67-1,85 %).
3. С увеличением податливости основания собственные частоты здания снижаются.
4. На расчетные частоты и формы собственных колебаний здания значительное влияние оказывает интенсивность приложенной на перекрытия временной нагрузки. Сходимость численных значений частот собственных колебаний здания с экспериментальными значениями при учете только длительной части временной нагрузки от веса людей и оборудования достаточно высокая. Расхождение составляет не более 5,9 %. Чем выше интенсивность действующей нагрузки, тем ниже оказываются расчетные частоты.
5. Анализ результатов расчета показывает, что возникновение повреждений и дефектов конструкций зданий в локальных зонах, величина которых несущественно снижает общую жесткость всего каркаса, практически не влияет на динамические параметры здания. Напротив, существенное снижение жесткости каркаса, связанное с повреждением несущих элементов в ответственных местах или появление дефектов, в результате которых возникает повсеместное снижение жесткости по всей высоте здания, может вызвать уменьшение собственных частот до 53 %.

Анализ результатов расчета показывает, что уменьшение жесткости отдельных несущих элементов каркаса в связи с образованием повреждений и дефектов вызывает перераспределение усилий на ближайшие участки и может вызвать дополнительные повреждения последних. Величина перераспределения усилий зависит от особенностей конструкции, объема и характера повреждений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия. – М., 1988 (с изм. 2003 г.).
2. Программный комплекс для расчета строительных конструкций на прочность, устойчивость и колебаний Stark_ES. Руководство пользователя – М.: Еврософт, 2008. – 383 с.
3. Городецкий А.С., Евзеров И.Д. Компьютерные модели конструкций. – Киев: Издательство «Факт», 2005. – 344 с.

REFERENCES

1. SNiP 2.01.07-85* Loads and impacts. – M., 1998 (with changes in 2003 year).
2. Program complex for calculation of building structures on the strength, stability and fluctuations of the Stark_ES. User's guide. – M.: Evrosoft, 2008. – 383 p.
3. Gorodetsky A.S., Evzerov I.D. Computer models of constructions. – Kiev: Publishers «Fact», 2005. – 344 p.