

УДК 69.07-69.04-699.83-69.032.22-721.011.27

Лукашенко В.И. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: vil_06_4444@mail.ru

Барханов А.И. – соискатель

E-mail: barhanovai@gmail.com

Вафина Д.А. – студент

E-mail: diana_lineav@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Анализ эффективности применения КТП для отстройки колебаний высотных зданий при действии ветровых нагрузок

Аннотация

Проведены исследования эффективности применения КТП («конструктивно-технические перекрытия») для регулирования динамического поведения каркасов высотных зданий. Согласно предложенному ранее алгоритму инженерной методики исследования динамического поведения проведены расчеты каркасов высотных зданий с КТП. В результате проведенных расчетов предложены схемы размещения КТП по высоте здания. Сделан вывод о сравнительной эффективности КТП для различных видов железобетонных каркасов. С учетом случайного характера ветровых нагрузок и возможности выхода за пределы резонансных зон, определяемых с учетом характеристик демпфирования, проведен вероятностный анализ.

Ключевые слова: ветровые нагрузки, дорожки Кармана, свободные колебания, резонансные зоны, отстройка спектра частот.

Введение

Высотным принято называть здание высотой более 75 м или более 25 этажей. Для характеристики зданий так же имеет большое значение соотношение размеров здания, которое в известной степени изменяет параметры обтекания здания воздушным потоком. Здание является плохо обтекаемым объектом, поведение которого в воздушном потоке характеризуется возникновением сложной конфигурации зон напора и разрежения, что вызывает колебания конструкций в различных направлениях. Для компенсации различных аэродинамических эффектов используются различные приемы, например сплошное остекление (рис. 1), устройства, разбивающие восходящие воздушный поток (рис. 2).



Рис. 1 Монтаж остекления ЖК «Лазурные небеса» (г. Казань)



Рис. 2. Здание Гостиницы Корстон (г. Казань)

Высотные здания, особенно здания значительной высоты, имеют свою специфику, существенно отличающую их от обычных зданий. С ростом высоты здания резко увеличиваются нагрузки на несущие конструкции, в связи с этим и с развитием высотного строительства применяется несколько конструктивных систем таких зданий: (каркасная, рамно-каркасная, поперечно-стенная, ствольная, коробчатая, ствольно-коробчатая). В районах со слабой сейсмичностью, к которым относится в том числе и Республика Татарстан и Казань, ветровые воздействия на высотные здания являются основными, а в целом аэродинамическое воздействие наружного климата на высотное здание является экстремальным. Поэтому исследования аэродинамики занимают значительную часть в общем объеме проектных работ. Как правило, эти исследования должны включать в себя физическое моделирование в аэродинамической трубе и математическое моделирование с применением вычислительной техники и программных комплексов.

Если для малоэтажных зданий ветровое давление принято считать равномерно действующим на все здание по высоте. То для высотного здания при расчете ветровых нагрузок и тепловых потерь необходимо учитывать рост скорости ветра по высоте. Повышенная высота здания определяет процесс обтекания его ветром. Аэродинамический режим обтекания высотного здания характеризуется повышенными значениями давления ветра. Положениями СНиП [8] по нагрузкам и воздействиям ветровое воздействие определяется как сумма среднего значения ветрового давления (статического) и пульсационной составляющей. В СНиП [8] приведены аэродинамические коэффициенты для основных форм и положений здания и элементов конструкций в пространстве. Однако лишь в последней редакции документа под названием СТО [9], выпущенной ЦНИИПСК им. Мельникова, имеются указания для определения нагрузок от резонансного колебательного воздействия ветра на конструкции зданий.

Для устранения опасных сочетаний частот свободных колебаний конструкций и внешнего воздействия используются различные методы, как то: устройство гибких этажей (первого), установка гидравлических и гравитационных маятников, установка дополнительных колебательных систем для дополнительного воздействия. В текущей работе предложен способ изменения параметров конструкций для изменения спектра частот свободных колебаний каркасов высотных зданий при помощи введения в конструкции в точках обусловленных особенностями особых элементов, жесткость которых уменьшена по сравнению с прочими элементами. Предложено размещать элементы с уменьшенной жесткостью в одном перекрытии и назвать его Конструктивно-Техническим Перекрытием (КТП). Наиболее удобным для сборных железобетонных каркасов расположением податливых элементов является узел стыка ригеля и колонны, в котором так или иначе образуется полость, требующая заполнения особым образом, что делает возможным создание в этой зоне податливого элемента. Таким же образом в монолитных железобетонных каркасах неизбежно образуются рабочие швы – зоны укладки бетонной смеси на поверхность уже затвердевшего бетона, которые могут быть использованы для создания податливых элементов сгруппированных в полосы.

Для оценки воздействия ветрового потока, имеющего различные направления, на колебания высотного здания проведен расчет частот срывов вихрей, характерных для плохо обтекаемых тел при различных скоростях ветра.

Проведены исследования эффективности регулирования частот свободных колебаний каркасов высотных зданий при помощи КТП. Исследования состояли из расчета конечно-элементной модели каркаса здания содержащего в себе один или несколько этажей с КТП.

На примере железобетонного каркаса размером 18x18x108 м (рис. 3), с расстояниями между колонн 9x4,5 м при помощи Эра ПК-2000 исследовано влияние групп КТП различного размера на спектр частот свободных колебаний каркаса. При этом группа КТП формировалась последовательным увеличением количества КТП начиная с первого этажа.

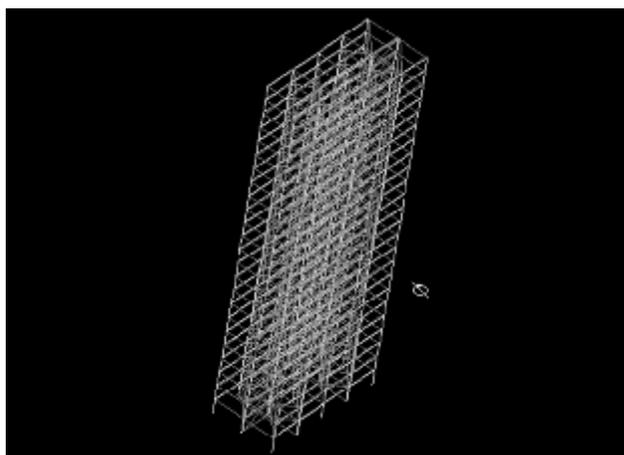


Рис. 3. Расчетная модель Эра ПК-2000

Результаты серии расчетов приведены на рис. 4.

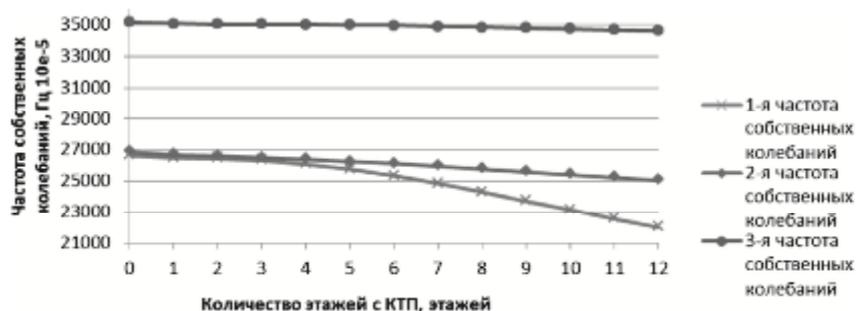


Рис. 4. График изменения частот свободных колебаний

На основе полученных результатов может быть определена интересующая степень изменения частот свободных колебаний каркаса здания.

Проведены расчеты с целью определения влияния на спектр частот свободных колебаний каркаса высотного здания уровня расположения группы КТП. Количество КТП определено на основании графика на рис. 4. Для этого расчета использована модель высотного здания размером 27x27x210м, 54 этажа. На рис. 5 изображен график влияния высоты в этажах расположения нижней границы группы КТП на изменение частоты свободных колебаний каркаса здания относительно каркаса без КТП.

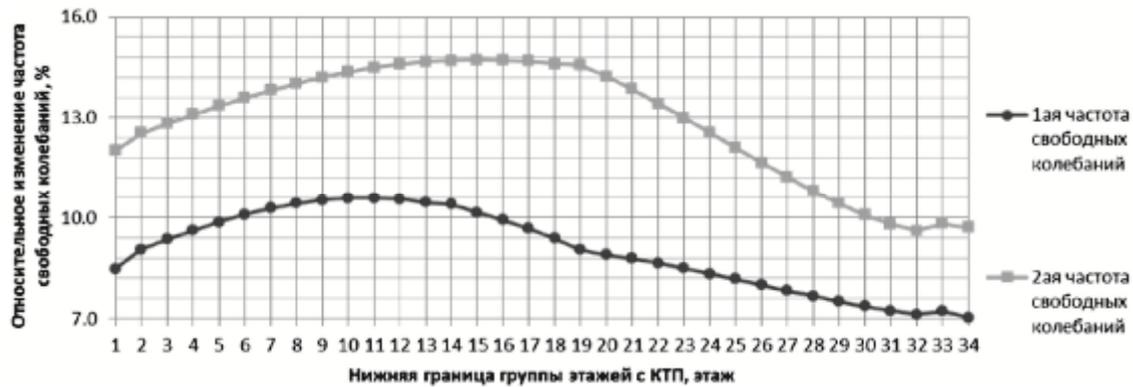


Рис. 5. График влияния высоты расположения группы КТП на частоты свободных колебаний

Вероятностный анализ. К вопросу оценки эффективности применения КТП для отстройки спектра частот колебаний высотных зданий при действии случайных ветровых нагрузок и возможности выхода за пределы резонансных зон, определяемых с учетом характеристик демпфирования, проводился вероятностный анализ. Исследовались две случайные величины: частоты вихрей от ветровых нагрузок, которые определяются случайным характером ветровых нагрузок, и частоты свободных колебаний здания. Был определен диапазон скоростей ветра для конкретных условий (ветер в Казани) и диапазоны частот трех первых форм собственных колебаний с учетом и без учета КТП для модели, представленных на рис. 4, 5. С использованием статистического моделирования нормального равномерного распределения случайных величин были определены характеристики этих величин: дисперсия $\sigma=0,096 \text{ гц}^2$, математическое ожидание $\bar{f}=0,256 \text{ гц}$, доверительный интервал $P=[0,239; 0,273] \text{ гц}$, стандарт $\sqrt{\sigma}=0,0092 \text{ гц}$.

От обтекания высотного здания потоком ветра образуется вихревая дорожка Кармана, которая создает периодическое нагружение сооружения при срыве вихрей. Для нахождения частоты этих нагрузок, необходимо определить число Рейнольдса, а потом, зависящее от него число Струхала:

$$Re = \frac{rv \cdot d}{\mu} \tag{1}$$

где $r = 1,293 \text{ кг/м}^3$ - плотность среды (воздух),

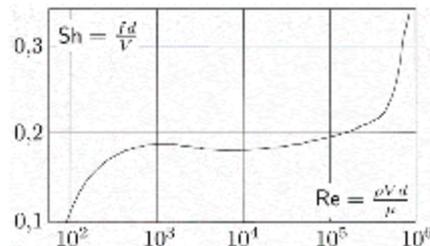
$v = 7,25-58 \text{ м/с}$ - характерная скорость,

$d = 27-38,34 \text{ м}$ - ширина здания,

$\mu = 1,83 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$ - динамическая вязкость среды (воздух).

В данном случае рассмотрены наиболее неблагоприятные направления ветра: лобовое с площадью соприкосновения погонного ветрового потока и здания 27 м^2 и $38,34 \text{ м}^2$. Число Рейнольдса, Струхала и частоту срыва вихрей определяют при скорости $7,27-58 \text{ м/с}$.

$Re = 1,389 \cdot 10^{-4} - 1,107 \cdot 10^{-5}$ для 27 м , и $Re = 1,967 \cdot 10^{-4} - 1,573 \cdot 10^{-5}$ для $38,34 \text{ м}$.



Исходя из графика зависимости Числа Струхала от числа Рейнольдса $Sh=0,2$. Частоты вихрей определяются по формуле (2):

$$f = Sh \cdot v / d, \tag{2}$$

где Sh - число Струхала,

v - скорость ветра, м/с,

d - ширина фронта соприкосновения ветрового потока и сооружения, м,

$f = (0,053-0,429) \text{ гц}$, $d = 27 \text{ м}$,

$f = (1,0378-0,302)$ гц, $d = 38,34$ м.

Зная характеристики случайных величин при обеспеченности 0,99 и 0,95, определяем диапазон частот случайных периодических ветровых нагрузок, их вариативность и коэффициент перегрузки.

При обеспеченности 0,99

При 27 м:

$$\bar{f} = 0,258 \text{ гц}, S = 0,0093 \text{ гц}^2, P = [0,241; 0,275] \text{ гц}, \sqrt{S} = 0,096 \text{ гц.}$$

При 38,34 м:

$$\bar{f} = 0,155 \text{ гц}, S = 0,0048 \text{ гц}^2, P = [0,143; 0,167] \text{ гц}, \sqrt{S} = 0,078 \text{ гц.}$$

При обеспеченности 0,95

При 27 м:

$$\bar{f} = 0,2426 \text{ гц}, S = 0,0122 \text{ гц}^2, P = [0,223; 0,262] \text{ гц}, \sqrt{S} = 0,125 \text{ гц.}$$

При 38,34 м:

$$\bar{f} = 0,160 \text{ гц}, S = 0,006 \text{ гц}^2, P = [0,146; 0,174] \text{ гц}, \sqrt{S} = 0,06 \text{ гц.}$$

Диапазоны частот трех первых форм собственных колебаний с учетом и без учета КТП для модели, представленные на рис. 4, при различном расположении КТП позволяют определить характеристики управляемости частотами по каждой форме, если определить их изменчивость и коэффициент однородности как случайных величин, распределенных равномерно в полученных диапазонах. Графики для определения диапазонов изменчивости частот 1, 2, 3 форм колебаний здания при ветровой нагрузке на 27 м и 38,34 (рис. 6) и (рис. 7) при обеспеченности 0,99 показаны ниже.

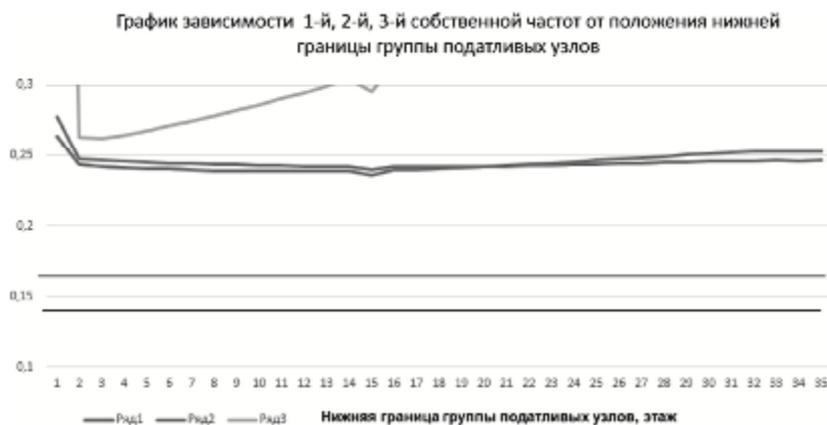


Рис. 6.

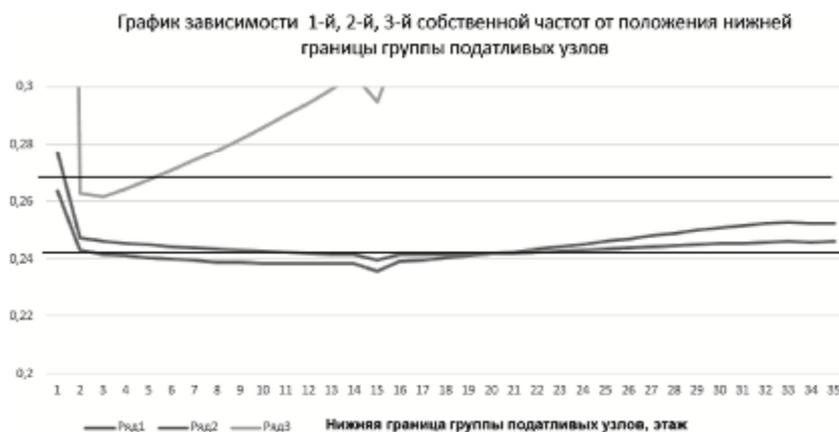


Рис. 7.

На рис. 6 видно, что случайные величины частот первых трех форм колебаний и интервал P для характеристики случайной величины частоты вихрей не пересекаются. Это означает, что в данном случае отстройка спектра частот не требуется.

На рис. 7 интервалы этих случайных величин пересекаются, что ставит вопрос о возможности отстройки частот с помощью варьирования расположения КТП, чтобы уйти от этого пересечения.

Используя характеристики изменчивости случайных величин частот воздействия (F) и управлениями частотами собственных колебаний здания (R) можно определить случайный коэффициент запаса управляемости ($K = R/F$). Для начала вычисляется коэффициент перегрузки для ветра (F) и коэффициент однородности для 3-х форм колебания здания (R) с доверительной вероятностью обнаружения их математического ожидания 0,99.

$$K_{\pi} = 1 + \beta V_f$$

$\beta = 2,33$ – функция Гаусса для 0,99
 V_f – вариативность $V_f = \frac{\sqrt{\sigma}}{f}$
 Для ветровой нагрузки

- $K_{\pi} = 1,448$ для 27 м
- $K_{\pi} = 1,398$ для 38,34 м

K_{0i} – коэффициент однородности
 $K_{0i} = 1 - \beta V_{fi}$
 Для 3-х форм колебания здания

- $K_{01} = 0,96$
- $K_{02} = 0,938$
- $K_{03} = 0,25$

Коэффициент однородности наибольший получился по 1-й форме колебаний (основной форме колебаний) так как по этой форме вышла наименьшая вариативность.

$$K_f \text{ - коэффициент управляемости } K_f = 1 + \sqrt{1 - K_{0i} K_{\pi i} (2 - K_{0i})(2 - K_{\pi i})} / K_{0i} (2 - K_{0i})$$

- $K_1 = 2,04$
- $K_2 = 2,05$
- $K_3 = 3,32$

По этой форме выходит наибольший отклик, динамическая реакция и мы можем сами конструктивно определить ширину резонансной зоны с учётом демпфирования. Таким образом, использование КТП для отстройки частот позволяет с коэффициентом запаса управления 2.04 по отношению к частоте вихрей регулировать частоту первой формы, наиболее опасной при резонансе.

Вывод. С доверительной вероятностью 0,99 мы можем отстроить не менее чем с двойным запасом диапазон частот первых трех форм колебаний относительно частот вихревых воздействий при заданном диапазоне ветровых нагрузок.

Список библиографических ссылок

1. Ржаницын А.Р. Строительная механика. Учебное пособие для вузов. – М.: Высш. Школа, 1982. – 400 с.
2. Гусев А.С. Вероятностные методы в механике машин и конструкций. Учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 224 с.
3. Райзер В.Д. Расчет и нормирование надежности строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1995. – 352 с.
4. Ржаницын А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. – М.: Стройиздат, 1978. – 240 с.
5. Манапов А.З. Учебное пособие «Расчет надежности и ресурса строительных конструкций методом статистического моделирования». – Казань, КГАСУ, 2010. – 132 с.

6. Болотин В.В. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в трех томах. Том 1. (Глава 7 и 8). – М.: Машиностроение, 1968. – 831 с.
7. Лукашенко В.И., Абдюшев А.А., Доронин М.М., Нуриева Д.М., Сладков А.В. Экспертиза, расчет, анализ пространственных конструкций: Монография. – Казань: КГАСУ, 2006. – 321 с.
8. СНиП 2.01.07-85*. Нагрузки и воздействия. – М.: ФГУП ЦПП, 2005. – 44 с.
9. СТО 36554501-015-2008. Нагрузки и воздействия. – М.: ФГУП «НИЦ «Строительство», 2008. – 62 с.

Lukashenko V.I. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: vil_06_4444@mail.ru

Barkhanov A.I. – researcher

E-mail: ayubalasy@mail.ru

Vafina D.A. – student

E-mail: diana_lineav@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Effectiveness analysis of STO application for frequency spectrum adjustment of high rise building under the wind loads

Resume

Analysis of effectiveness of STO (structural and technical overlap) for frequency spectrum adjustment of high rise building under the wind loads carried out. According with algorithm of engineer method of dynamic behavior suggested earlier analysis calculations of high rise building frames with STO. As a result of calculations schema of positioning of STO within stories suggested. Concluded comparative effectiveness of STO for different reinforced concrete frames of high rise buildings. Considering occasional character of wind loads and possibility of exiting of resonance area, calculated taking in account damping parameters, carried out probabilistic analysis.

Keywords: wind loads, Karman vortex street, free oscillation, resonance, frequency spectrum adjustment.

Reference list

1. Rzhnitsyn A.R. Structural mechanics. Textbook. – М.: Vishaya SHkola, 1982. – 400 p.
2. Gusev A.S. Probabilistic methods in mechanics of machines and constructions. Textbook. – М.: Publishing house MGTU named after Bauman, 2009 – 224 p.
3. Riser V.D. Calculation of reliability and standardization of building structures. – М.: Stroizdat., 1995. – 352 p.
4. Rzhnitsyn A.R. Theory of design of structures for reliability. – М.: Stroizdat, 1978. – 240 p.
5. Manapov A.Z. Calculation of reliability and service life of building structures by means of statistical modeling: KGASU, 2010. – 132 p.
6. Bolotin V.V. The strength, stability, vibrations. Guide in three volumes, Vol. 1 (Chapter 7 of 8). – М.: Publishing house Mashinostroenie, 1968. – 831 p.
7. Lukashenko V.I., Abdyushev A.A., Doronin M.M., Nurieva D.M., Sladkov A.V. Examination, calculation, the analysis of spatial designs: Monography, Publishing house KGASU, Kazan, 2006. – 321 p.
8. SNiP 2.01.07-85*. Loads and effects. – М.: Publishing house FGUP TSPP, 2005. – 44 p.
9. STO 36554501-015-2008. Loads and effects. – М.: Publishing house FGUP «NITS «Stroitelstvo», 2008. – 62 p.