

УДК 699.83

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА
НА СООРУЖЕНИЯ

Т. Н. Стородубцева, Д. С. Кузнецов, А. Г. Князев, Е. Н. Петрова

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова»

Email: tamara-tns@yandex.ru

Ветровая нагрузка является одним из важнейших факторов, который необходимо учитывать при проектировании высоких зданий и гибких конструкций. Казалось бы, как обычный ветер может повлиять на устойчивость сооружения из стали и бетона, вес которого доходит до сотен тысяч тонн? Все дело в том, что ветровая нагрузка, приложенная к поверхности конструкции, заставляет эту самую конструкцию колебаться на определенной частоте. Любое сооружение изначально имеет свою собственную частоту колебаний. Частота колебаний, вызванных воздействием ветровой нагрузки, может совпасть с частотой собственных колебаний конструкции, вызвав тем самым явление механического резонанса, способного разрушить даже очень крепкие сооружения.

Темой данной работы является ветровая нагрузка, расчет высотных зданий и гибких конструкций на ветровую нагрузку, механический резонанс и способы борьбы с ним применительно к высотным сооружениям.

Понятие резонанса уже давно прочно вошло в лексикон современного человека. Мы настолько привыкли к этому слову, что, употребляя его, мы порой не задумываемся об истинном значении этого термина в различных отраслях науки и техники, вкладывая в него свой, строго определенный смысл. Чаще всего под понятием резонанса люди понимают реакцию множества людей (возмущение, волнение, отклики и т. д.) на определенные действия (информация, поведение, высказывание и т. п.) кого-либо или чего-либо. Отчасти это определение является верным, но следует уточнить, что понятие резонанса имеет и иную, научную формулировку, отличную по значению от приведенной ранее. В нашем исследовании мы будем понимать под резонансом следующее:

Резонансом называется резкое возрастание амплитуды вынужденных колебаний при приближении частоты вынуждающей силы к собственной частоте колебательной системы.

Амплитуда вынужденных колебаний зависит от частоты вынуждающего

воздействия, она достигает максимального значения при совпадении частоты вынужденных колебаний ν с собственной частотой (частотой свободных колебаний) системы ν_0 . При приближении частоты вынужденных колебаний к частоте собственных амплитуда колебаний возрастает. Явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний при приближении ν к ν_0 называется резонансом. Частота, при которой амплитуда вынужденных колебаний максимальна, называется резонансной [1, 2].

Амплитуда вынужденных колебаний зависит от силы трения. Она уменьшается с увеличением силы трения, а резонансные кривые становятся более пологими (острый и тупой резонанс). Если сила трения очень мала то амплитуда вынужденных колебаний, как показывают расчеты, определяется по формуле

$$A = \frac{F_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2}, \quad (1)$$

где ω и ω_0 – циклические частоты свободных и вынужденных колебаний системы, F_0 – амплитуда внешней периодической силы. При стремлении ω к частоте свободных колебаний ω_0 амплитуда A вынужденных колебаний стремится к бесконечности.

Стоит упомянуть такую характеристику колебательной системы, как добротность. Добротность обратно пропорциональна скорости затухания собственных колебаний в системе. То есть, чем выше добротность колебательной системы, тем меньше потери энергии за каждый период и тем медленнее затухают колебания. Добротность – это параметр колебательной системы, определяющий ширину резонанса и характеризующий, во сколько раз запасы энергии в системе больше, чем потери энергии за время изменения фазы на 1 радиан.

Общая формула для добротности колебательной системы:

$$Q = \frac{2\pi W f_0}{P_d}, \quad (2)$$

где f_0 – резонансная частота колебаний, W – энергия, запасённая в системе, P_d – рассеиваемая мощность.

Это незаметно человеческому глазу, но все высотные здания слегка раскачиваются на ветру [3]. При порывах ветра верхушка небоскреба может смещаться от своей оси на несколько метров. И если частота собственных колебаний небоскреба совпадет с частотой колебаний, передаваемых ветровой нагрузкой, то может про-

изойти резонанс, способный привести к обрушению здания. Поэтому важнейшей задачей является сведение раскачивания небоскреба к минимуму. Для этого инженеры в верхней части зданий устанавливают гигантские противовесы, называемые настроенными амортизаторами массы – tuned mass dampers (TMD). В большинстве случаев амортизаторы TMD представляют собой гигантский шар из стали и бетона, вес которого достигает 800 тонн. Этот шарик подвешивается на пружинах и поршнях в верхней части зданий и беспрепятственно балансирует при изменении угла наклона здания. По сути, его задача состоит в сохранении положения центра масс небоскреба. Любой небоскрёб можно рассматривать как гигантский камертон. Если по нему сильно ударить, например, порывом ветра или землетрясением, то здание начнет вибрировать на заданной частоте. В этом случае противовес TMD начинает двигаться с той же частотой, что и здание, но в противоположном направлении. Примером небоскреба, в котором применяется данный механизм, может служить небоскрёб Тайбэй 101 в Китае высотой 509 метров. Внутри этого здания установлен гигантский противовес в виде шара, характеристики которого поражают воображение. Его диаметр равен – 5,5 метров, а вес – 728 тонн. Шар способен гасить колебания небоскрёба, даже если скорость ветра составляет 240 км/ч.

Иногда инженеры устанавливают в конструкцию небоскрёба не один, а сразу несколько противовесов. Например, 55-ти этажное здание Shinjuku Mitsui Building было построено в 1974 г. [4]. Установка антисейсмических противовесов началась в апреле 2015 г. и стоила 40,5 миллионов долларов. Противовес, установленный в здании Shinjuku Mitsui Building, представляет собой груз весом 300 тонн, подвешенный внутри мощной металлической рамы в форме усечённой пирамиды. Всего на крыше небоскрёба было установлено шесть таких устройств общим весом 1800 тонн. По заверениям представителей фирмы, они на 60 % способны снизить воздействие долговременных колебательных движений грунта.

В практике эксплуатации высоких сооружений и гибких конструкций хорошо известны случаи, когда такие системы, достаточно надежные при действии на них установившихся ветровых нагрузок, обнаруживают в условиях естественного ветра склонность к раскачиванию, т. е. становятся аэродинамически неустойчивыми. Такого рода неустойчивость отражает взаимодействие между сооружением и потоком ветра.

Ветровые нагрузки, способные с помощью явления резонанса обрушить весьма крепкие конструкции из стали и композиционных материалов, например, бетона [5, 6], являются одним из важнейших факторов, которые необходи-

мо учитывать при проектировании и строительстве высоких зданий, сооружений и конструкций. Объектом исследования в данной работе является воздействие ветровой нагрузки на высокие здания и сооружения, а также методы расчета на ветровую нагрузку.

Ветровую R_3 нагрузку можно отнести к динамическим нагрузкам. Динамические нагрузки в свою очередь делятся на повторно-переменные, ударные, внезапно приложенные и инерционные [7, 8]. Рассмотрим ω повторно-переменные нагрузки, которые вызывают в конструкциях периодически изменяющиеся напряжения и деформации. Сопротивление деталей действию таких нагрузок существенно отличается от их сопротивления при статическом нагружении. Сопротивление деталей действию таких нагрузок существенно отличается от их сопротивления при статическом нагружении.

Анализ разрушений деталей машин, конструкций и сооружений показывает, что материалы, длительное время подвергавшиеся действию переменных нагрузок, могут разрушаться при напряжениях более низких, чем предел прочности и даже предел текучести. Разрушение при этом происходит вследствие усталости материала.

На практике влияние динамической нагрузки, как правило, учитывается с помощью динамического коэффициента K_D . Для получения максимальных значений динамических напряжений и перемещений динамическая нагрузка заменяется статической, а найденные от нее напряжения и перемещения умножаются на динамический коэффициент.

$$\sigma_D = \sigma_{ст} K_D. \quad (3)$$

При вынужденных колебаниях системы с грузом Q под действием возмущающей силы H , вызывающей эти колебания, динамический коэффициент вычисляется по формуле

$$K_D = 1 + \frac{H}{Q} \beta. \quad (4)$$

Коэффициент нарастания колебаний при учете сил сопротивления среды

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right) + \left(\frac{2\alpha}{\omega_0}\right)^2 \times \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}}, \quad (5)$$

где ω – частота вынужденных колебаний, ω_0 – частота собственных колебаний системы, α – коэффициент, учитывающий силы сопротивления среды.

Ветровая нагрузка на тело заданной формы, обтекаемое установившимся потоком, определяется по формуле

$$Q = \frac{l}{2} \rho v^2 S \Phi(\rho, \eta, \nu, \alpha, d), \quad (6)$$

где S и d – характеристические площадь и размер тела; v – скорость невозмущенного потока; ρ – плотность воздуха; μ – его вязкость, α – угол, который определяет направление скорости; Φ – некоторый безразмерный параметр. Последний является функцией α и числа Рейнольдса Re , где

$$Re = \frac{vd}{\nu}, \quad (7)$$

где $\nu = \mu / \rho$ – кинематическая вязкость воздуха. Число Рейнольдса характеризует зависимость сопротивления от вязкости воздуха [9]. Из выражения

$$Q = \frac{l}{2} \rho v^2 S \Phi(\alpha, Re), \quad (8)$$

можно установить, что течения одинакового типа с одинаковым числом Рейнольдса динамически подобны.

Для неустановившегося движения воздуха пользуются критерием подобия Струхаля, $Sh = nd / v$ где n – частота срыва вихрей. Законы подобия играют важную роль в экспериментальной аэродинамике. Чтобы добиться соответствия между модельным испытанием и натурными условиями, модельный поток по интенсивности турбулентности должен соответствовать потоку ветра.

При проектировании высоких сооружений очень важным является определение нормативного значения равнодействующей ветрового давления. Определить это значение можно по следующей формуле:

$$Q_H^C(z) = c q_{0t}(z) S. \quad (9)$$

Для составляющих $Q_H^C(z)$ в направлении скорости ветра (лобового сопротивления) $Q_{XH}^C(z)$ и в перпендикулярном к ней направлении (поперечной силы) $Q_{YH}^C(z)$ аэродинамический коэффициент соответствует коэффициентам c_x и c_y , для составляющих $Q_H^C(z)$ в направлении осей конструкции – коэффи-

циентам C_n и C_t , что показано на рисунке.

Рассмотрим типичные для высоких сооружений два явления аэродинамической неустойчивости.

Первое – вихревое возбуждение, которое наблюдается при колебаниях дымовых труб, радиомачт и тому подобных гибких сооружений цилиндрической формы и объясняется вихреобразованием в следе за сооружением при обтекании его потоком ветра.

Второе явление общепринято называть галопированием. Галопированию подвержены все плохо обтекаемые гибкие конструкции с аэродинамически неустойчивыми поперечными сечениями (квадратным, прямоугольным, ромбовидным), покрытые льдом провода антенно-мачтовых систем и линий электропередачи, а также конструктивные элементы из уголков и швеллеров высоких опор ЛЭП. Колебания такого типа определяются формой и расположением тела относительно потока, его изгибной и крутильной жесткостями, и, наконец, величиной конструкционного демпфирования.

Критическую скорость ветра, вызывающую резонансные колебания сооружения в направлении, перпендикулярном ветровому потоку, допускается определять по формуле

$$V_{кр} = \frac{d}{TSh}, \quad (10)$$

где T – период собственных колебаний сооружения, Sh – число Струхала поперечного сечения (для круга $Sh = 0,2$, для сечения с угловыми точками $Sh = 0,15$); d – диаметр сооружения, для сооружений с малой коничностью – диаметр его сечения на уровне 2 / 3 высоты.

При проверке на резонанс амплитуду интенсивности динамической силы $F_i(z)$ на уровне z при колебаниях сооружения по i -й форме определяется по формуле

$$F_i(z) = F_{0i}\alpha_i(z), \quad (11)$$

где $\alpha_i(z)$ – относительная ордината i -й формы собственных колебаний; $Q_H^C(z)$ – амплитуда интенсивности на уровне свободного конца сооружения консольного типа или в середине пролета трубчатой мачты на вантах.

Резонансные усилия и перемещения сооружения в сечении с координатой z допускается определять по формуле

$$X^{pez}(z) = \frac{\pi}{\delta} X^c(z), \quad (12)$$

где $X^c(z)$ – прогиб, изгибающий момент или поперечная сила от статически приложенной нагрузки $F_i(z)$; для мачт на вантах в качестве расчетного значения $F_i(z)$ принимается наибольшее из значений,

Расчетную статическую составляющую ветровой нагрузки по направлению действия ветра, соответствующую критическому скоростному напору, допускается принимать постоянной по высоте сооружения и равной

$$q_{кр}^c = q_{кр.i} c_x, \quad (13)$$

где c_x – коэффициент лобового сопротивления.

Расчетные усилия и перемещения сооружения при резонансе допускается определять по формуле

$$X(z) = \sqrt{[X^{pez}(z)]^2 + [X^c(z) + X^D(z)]^2}, \quad (14)$$

где X^{pez} – перемещение, изгибающий момент или поперечная сила, определяемая по формуле (12); $X^c(z)$, $X^D(z)$ – то же, но от нагрузок $q_{кр}^c$ и $q_{кр}^D$.

Заключение

Основной причиной возникновения резонанса зданий и сооружений является ветровая нагрузка. Именно она является основным фактором, вызывающим колебания высоких сооружений и гибких конструкций. Поэтому расчет на аэродинамическую неустойчивость сооружений и гибких конструкций является одной из важнейших инженерных задач. Ее решение способно свести к минимуму риск разрушения сооружения в результате воздействия ветровой нагрузки, что в свою очередь позволит избежать огромных финансовых потерь и человеческих жертв. Среди основных способов борьбы с механическим резонансом являются: учет возможности возникновения резонанса при проектировании и строительстве зданий и сооружений. Сюда входят инженерные расчеты и подбор материалов, способных выдержать большую нагрузку, не разрушаясь; создание дополнительного воздействия на систему в противофазе к вредному, что позволит компенсировать его и избежать возникновения резонанса, на котором основана система противовесов, которые устанавливаются в конструкцию зданий и сооружений; разработка определенной системы норм и правил, регулирующих безопасность эксплуатации зданий, сооружений и гибких конструкций.

Библиографический список

1 Разрушение Такоцкого моста. Явление резонанса [Электронный ресурс]. – Режим доступа [http : //fizportal.ru/destruction-bridge](http://fizportal.ru/destruction-bridge). – Загл. с экрана.

2 Электронный учебник физики [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.physbook.ru/index.php/A._Резонанс/. – Загл. с экрана.

3 Гигантский шар внутри небоскрёбов удерживает их от колебаний [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.factroom.ru/life/tuned-mass-dampers>. – Загл. с экрана.

4 Японская компания установила на небоскрёб антисейсмический противовес [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://nplus1.ru/news/2015/07/30/Vibration-Control>. – Загл. с экрана.

5 Стородубцева, Т. Н. Сопротивление материалов : рек. УМО РАЕ по клас. унив. и техн. образованию в качестве учеб. пособия для студентов высш. учеб. заведений, обучающихся по направлениям подгот.: 151000.62 – «Технол. машины и оборудование», 190600.62 – «Эксплуатация трансп.-технол. машин и комплексов», 190700.62 – «Технология транспорт. процессов», 250400.62 – «Технология лесозаготов. и деревоперераб. пр-в» / Т.Н. Стородубцева. – М-во образования и науки Рос. Федерации, Фед. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. проф. образования "Воронеж. гос. лесотехн. акад.". – Воронеж, 2013. – 224 с.

6 Стородубцева, Т. Н. Теоретические и экспериментальные исследования композиционных материалов. Рекомендации по применению [Текст] / Т. Н. Стородубцева, А. И. Томилин, А. А. Аксомитный // Моделирование систем и процессов. – 2013. – Вып. 3. – С. 42-47.

7 Сопротивление материалов [Текст] : тексты лекций / Т. Н. Стородубцева ; М-во образования и науки РФ, ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». – Воронеж, 2015. – 164 с.

8 Сопротивление материалов [Текст] : Учебное пособие / Т. Н. Стородубцева ; М-во образования и науки РФ, ФГБОУ ВПО «ВГЛТА». – Воронеж, 2013. – 224 с.

9 Руководство по расчету зданий и сооружений на действие ветра / Центр. науч.-исслед. ин-т строит. Конструкций им. В. А. Кучеренко. – М. : Стройиздат, 1978. – 297 с.