

УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ БЕТОННЫХ СООРУЖЕНИЙ, ПОДВЕРЖЕННЫХ ДИНАМИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ: ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА И СПОСОБЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ

Мо Вей Ян У, Н.Н. Остроухов

Российский государственный технологический университет им. К.Э. Циолковского (МАТИ)
Москва, ул. Оршанская, 3
E-mail: sbb13@mail.ru

Выполнена расчетно-теоретическая проверка гипотезы о существенном влиянии на усталостную прочность тонкостенных бетонных элементов строительных сооружений сравнительно слабых динамических воздействий различного происхождения (ветровых, акустических, сейсмических и др.). Разрушение элементов рассматривается как процесс развития дефектов структуры бетона. Предложена расчетная модель для определения предела выносливости элементов конкретной конфигурации.

Ключевые слова: численная модель, бетонные сооружения, дефекты структуры, разрушение, динамические воздействия.

Введение. Цель работы состоит в численной проверке гипотезы [1], связывающей разрушение тонкостенных несущих бетонных элементов строительных сооружений с развитием дефектов структуры бетона, происходящим под влиянием относительно слабых систематических воздействий – ветровых, акустических и механических колебаний, генерируемых непосредственно в самом сооружении.

Актуальность работы обусловлена отсутствием единого мнения о причинах ряда аварий крупных строительных сооружений, произошедших при сходных обстоятельствах после значительного периода безаварийной эксплуатации и в отсутствие каких-либо аномальных воздействий в момент разрушения, а именно обрушении «Трансвааль-Парка» и Басманного рынка в Москве [2, 3], аварии здания в аэропорту «Руасси – Шарль де Голль» в Париже и др.

Конструктивно разрушившиеся сооружения объединяло наличие в них железобетонных несущих элементов с очень большим отношением поперечного размера к толщине. В «Трансвааль-Парке» и на Басманном рынке такими элементами были железобетонные перекрытия – кровли малой кривизны, через стальное кольцо опертые на колонны, а в здании парижского терминала – несущие стены. Динамические воздействия, о которых пойдет речь ниже, в таких элементах с необходимостью вызывают изгибные (поперечные) колебания, сопровождающиеся деформациями и напряжениями растяжения, стойкость бетона к которым вследствие сильной дефектности структуры низка.

1. Природные и техногенные источники динамических воздействий. Основные характеристики динамических воздействий. В процессе эксплуатации строительные сооружения, помимо расчетных статических, подвержены динамическим воздействиям различного происхождения: ветровым, акустическим, сейсмическим, а также механическим колебаниям, генерируемым непосредственно в самом сооружении.

Ветровые воздействия. Поток воздуха создает на обтекаемых элементах конструкции перепад давления, равный скоростному напору газа $P = \rho u^2 / 2$, где ρ – плотность, u – скорость газа. В случае сильного ветра ($u = 30$ м/с), при $\rho = 1,2$ кг/м³ скоростной напор составляет 540 Па, согласно [4] скорость ураганного ветра может достигать 40 м/с. Техногенные потоки газов, как правило, локализованы пространственно и в настоящей работе не рассматриваются. Преобладающие частоты ветровых нагрузок доставляет доли Гц: 0,1-1 Гц. Выходя за рамки настоящей работы, отметим, что ставшие широко известными колебания дорожного полотна автомобильного моста в Волгограде в мае 2010 года естественнее всего объяснить несимметричностью газодинамики ветровых потоков над и под пролетами моста. Если контур профиля поперечного сечения моста в верхней части длиннее, чем в нижней, то при ветре вдоль Волги возникала сила, направленная вверх, вполне аналогичная подъемной силе крыла самолета. Последующая реакция конструкции на такое возмущение осложнялась нестационарностью потока.

Акустические воздействия в основном имеют техногенную природу, в особенности длительные. Уровню (силе) звука L (Дб) соответствует [5] среднее давление P (Па) за падающей звуковой волной, аппроксимируемое выражением $P = 2 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{L/20}$. Таким образом, силе звука 150 Дб (возникающего при работе некоторых устройств) соответствует $P \approx 650$ Па. Частотный диапазон акустических воздействий очень широк ($20 \div 20 \cdot 10^3$ Гц), поэтому для отдельных элементов конструкций возможно возникновение резонанса. Частным случаем резонанса можно считать возникновение (установление) стоячих звуковых волн внутри свободных помещений большого объема (аналог «Трансвааль-Парка»). Резонансными при этом будут частоты, кратные отношению скорости звука к характерному размеру помещения. Весьма вероятно, что разрушение терминала в парижском аэропорту «Руасси – Шарль де Голль» произошло в основном в результате акустических воздействий от работающих вблизи авиационных двигателей.

Вследствие значительной ($\sim 10^2$ кг/м²) поверхностной плотности бетонных элементов строительных сооружений существует верхняя граница частоты колебаний (вибраций) ν^* , такая, что эффективное возбуждение колебаний происходит лишь при $\nu \leq \nu^*$. Сравнительно простые оценки показывают, что в большинстве случаев $\nu^* \leq 10$ Гц. Результатом ветровых и акустических воздействий является пульсирующее давление, изменяющееся в диапазоне от нуля до максимальных значений, указанных выше.

Наиболее сложны для расчетных оценок *динамические воздействия*, обусловленные генерируемыми непосредственно в сооружениях механическими колебаниями. Первичными источниками таких колебаний в городских условиях и в промышленных сооружениях являются работающее оборудование, транспорт и т. п. Колебания при этом могут передаваться либо элементам сооружения, находящимся в механическом контакте с источником, либо через промежуточную упругую среду [6], например вибрации от метро через грунт. Для целей настоящей работы диагностику таких колебаний предпочтительно проводить экспериментально, например непосредственно определяя деформацию рассматриваемого элемента конструкции. Забегая вперед, можно предложить конструктивно-технологический способ ослабления влияния таких колебаний, заключающийся в целенаправленном снижении добротности сооружения как колебательной системы введением в конструкцию элементов, способствующих диссипации колебательной энергии.

В тонкостенных элементах строительных конструкций уже возникшие механические колебания распространяются в виде поперечных (изгибных) волн, что сопро-

вождается возникновением в этих элементах деформаций и напряжений сжатия и растяжения.

Проще и надежнее экспериментальная диагностика и диагностика комбинированных воздействий, в особенности при несовпадении или случайном характере частот отдельных воздействий.

2. Особенности физико-механических свойств бетона и его чувствительность к динамическим воздействиям. Основная гипотеза настоящей работы о повышенной чувствительности бетона к динамическим воздействиям базируется на известных особенностях бетона как конструкционного материала, а именно композита [6], армированного дисперсными частицами (крупноразмерная фракция наполнителя), а в случае железобетона – одновременно и длинными волокнами (арматура).

Матрицей в этом композитном материале является отвердевшая песчано-цементно-водная суспензия, которой в процессе получения (изготовления) бетона заполняются пустоты между всеми армирующими элементами, а также между этими элементами и поверхностью бетона (опалубкой).

Все армирующие элементы и частицы песка (одна из фракций матрицы) имеют структуру поликристаллических твердых тел с химической (у арматуры – металлической) связью между молекулами (атомами), которой соответствует высокая прочность. Связь между частицами матрицы и между матрицей и армирующими элементами – адгезионная (поверхностная, силы Ван-дер-Ваальса), прочность которой на 1-2 порядка меньше прочности химической и металлической. Материал самой матрицы тоже можно считать композитом. В нем армирующими элементами являются частицы мелкозернистого наполнителя (песка), а матрицей – затвердевшая цементно-водная суспензия. Адгезионная связь возникает при сближении гидратированных частиц цемента с поверхностями всех остальных компонент бетона. Вследствие специфики технологии приготовления (получения) бетона (температура много меньше температур плавления, а давление соответственно меньше пределов текучести) для микроструктуры [7] матрицы бетона характерна высокая концентрация дефектов, в основном в виде пустот, т. е. незаполненных веществом матрицы пространств между двумя близко расположенными ограничивающими поверхностями. Специфика структуры бетона предопределяет особенности его механических свойств, в первую очередь, большую (по некоторым источникам [8], на порядок) прочность на сжатие по сравнению с прочностью на растяжение. В этом различии проявляются и фактическая несплошность бетона, и высокая концентрация напряжений в окрестностях вершины трещины, приводящая к их (трещин) росту даже при незначительных напряжениях, отличных от статических напряжений сжатия. Вследствие этого любые динамические воздействия (по определению не тождественные статическим напряжениям сжатия) вызывают рост дефектов структуры бетона (трещины) и, таким образом, разрушают элементы строительных сооружений.

3. Схема оценки усталостной прочности. Любая деформация бетонного элемента стимулирует развитие дефектов его структуры. В случае протяженных тонкостенных элементов преобладающей формой их деформации является поперечный изгиб. Для практических целей амплитуды предпочтительно определять экспериментально, в первую очередь, вследствие сложности реальной схемы нагружения конкретного элемента. Однако для качественных оценок величины деформаций тонких протяженных элементов под действием перепада давлений (что соответствует

ветровым и акустическим воздействиям) можно использовать решения по изгибу пластин и оболочек, например [9]. Изгиб таких элементов, расположенных вертикально, практически полностью соответствует указанным решениям. Для горизонтально ориентированных (и, как правило, предварительно нагруженных) элементов характерна определенная специфика, обусловленная, в частности, малым значением отношения возникающего перепада давления к удельному поверхностному весу элементов – $\alpha = P/\rho gh \sim 1$. При таких значениях α действие соизмеримого с удельным весом давления, направленного вверх, эквивалентно уменьшению или полному отсутствию внешней нагрузки на элемент.

Схема базируется на следующих положениях:

– во-первых, любому конечному динамическому воздействию соответствуют конечные (ненулевые) напряжения и относительные деформации, в т. ч. и относительные деформации растяжения;

– во-вторых, вследствие описанной выше специфики структуры бетона вблизи дефектов структуры, особенно в окрестности вершин трещин, никакая конечная деформация растяжения не может быть упругой, но всегда сопровождается ростом трещины.

Сформулированные положения были приняты в качестве основных допущений для расчетной модели усталостного разрушения при вибрационных воздействиях. Используя в качестве исходных данных ветровую и акустическую нагрузку, определяют [8] максимальный прогиб элемента сооружения $\xi = \xi(P, R, h)$, где R и h – соответственно характерный размер элемента и его толщина. В частности, для круглой шарнирно опертой пластины

$$\xi = \beta R^2 \left(\frac{5 + \mu}{1 + \mu} R^2 \right); \quad \beta = \frac{3P(1 - \mu^2)}{16hE},$$

где P – перепад давления, μ – коэффициент Пуассона.

Полагая деформированную поверхность сферой, определяют относительные деформации растяжения поверхности элемента $\varepsilon = (\xi / R)^2$ (отношение площадей элемента после деформации и до нее).

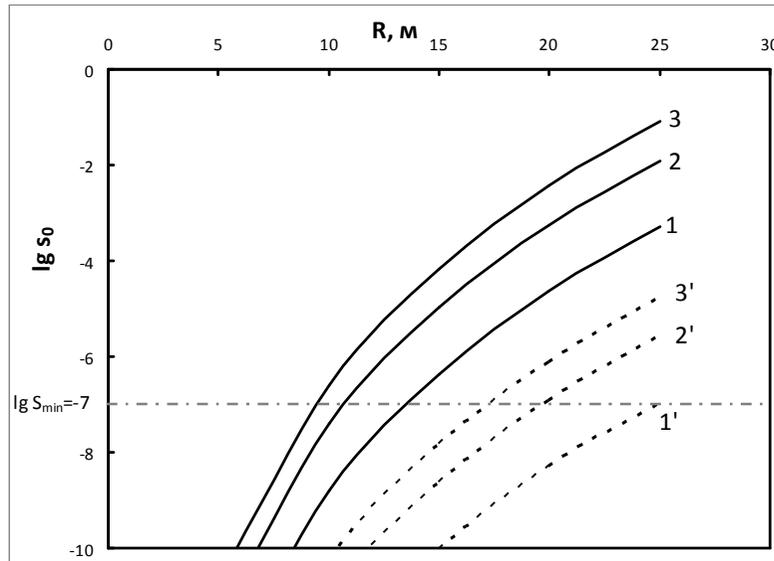
Увеличение поперечного (в плоскости элемента) размера отдельного дефекта оценивается величиной $s = \varepsilon/\lambda$, где λ (m^{-1}) – линейная концентрация дефектов, которую по данным [7] можно считать равной обратному характерному размеру частиц крупной армирующей фракции.

В отсутствие надежных данных о процессе развития трещины для построения качественной схемы можно допустить, что в перпендикулярном направлении (вглубь элемента) трещины увеличиваются тоже на величину s .

Для реализации описанного механизма развития дефекта необходимо, чтобы отдельный шаг s был больше некоторого минимального, так чтобы он действительно сопровождался разрушением межмолекулярных (ван-дер-ваальсовых) связей в слое, толщина которого много больше толщины мономолекулярного. В качестве порогового значения s_{min} можно принять величину $10^{-7}m$ (0.1 мкм), приблизительно соответствующую 100 толщинам моноатомных слоев, или средний размер отдельной частицы цемента d_c ($1 \div 100$ мкм). Если удлинение трещины сравнимо с толщиной монослоя, то вполне вероятно восстановление сплошности материала и адгезионной связи после прохождения волны деформации.

Если в начале эксплуатации условие $s > s_{min}$ выполняется, дальнейший расчет процесса разрушений очевиден. После первого воздействия эффективная толщина несущего элемента уменьшается на величину s_1 : $h_1 = h_0 - s_1$. Для уменьшенной толщины деформация ξ будет больше предыдущей, этой большей деформации соответ-

ствует бóльший шаг s_2 , так что $h_2=h_1 - s_2$. Таким образом, цикл численного расчета замыкается. Минимально допустимая толщина несущего элемента определяется независимо, например из условия предельных статических нагрузок. Если на k -том шаге цикла окажется, что $h_k=h_{min}$, то $N=k$ есть число циклов нагружения, т. е. единичных воздействий, которое рассматриваемый элемент выдерживает до разрушения, или это число циклов нагружения, для которого пределом выносливости является расчетное статическое напряжение.



Зависимость «начального» шага увеличения размера трещины от радиуса круглой шарнирно опертой пластины толщиной h для нескольких значений равномерного по площади давления $P=500; 1000; 1500$ Па (кривые 1, 2, 3) $h=0,1$ м (сплошная линия) и $h=0,25$ м (пунктир)

На рисунке представлена зависимость величины s_0 (первого шага развития трещины) от радиуса (R) круглой бетонной пластины толщиной h при воздействии на нее равномерного по площади давления P . Из рисунка видно, что при достаточно высоких значениях величины $r=2R/h$ и давлениях, характерных для описанных в п. 1 внешних воздействий, величина s достигает пороговых значений $\sim 10^{-7}$ м, что и является условием начала разрушения несущего элемента даже независимо от расчетной статической нагрузки.

Значения r^* , при которых $s_0 \geq s_{min} \approx 10^{-7}$, определяют область применимости описанной модели. При $r < r^*$ начальный шаг меньше порогового s_{min} – разрушение не начинается: при $r \geq r^*$ разрушение происходит. Для кривых (1) на рисунке, соответствующих минимальному динамическому давлению 500 Па $s_{min} = 10^{-7}$ м, достигается при значениях r^* 300 и 200 для толщин 0,1 и 0,25 м соответственно. Для купола «Трансвааль-Парка» величина r превышала 500, т. е. для него описанный механизм разрушения был вполне реален. Время, за которое происходит N единичных воздействий с $s > s^*$, можно считать верхней границей периода безаварийной эксплуатации сооружений.

Косвенным подтверждением того, что разрушение рассматриваемых сооружений происходило вследствие протяженного во времени процесса развития дефектов структуры бетона, можно считать полную сохранность конструкции автомобильного моста в Волгограде, в котором 20 мая 2010 г.[10] под действием ветра возникли ко-

лебания с амплитудой до 0,5 м (по некоторым свидетельствам до 1 м). Межопорные перекрытия моста выполнены из стали, структура которой существенно совершеннее структуры бетона. В сочетании с большим пределом упругости стали отсутствие дефектов структуры, подобных дефектам структуры бетона, обусловило сохранность сооружения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Остроухов Н.Н.* Почему рухнул «Трансвааль-Парк» // Наука и жизнь. – 2006. – №9. – С. 74-75.
2. *Назаров Ю.П., Жук Ю.Н., Симбиркин В.Н., Егоров М.И.* Басманный рынок: анализ конструктивных решений и возможных механизмов разрушения здания // Строительная механика и расчет сооружений. – 2007. – №2. – С. 49-55.
3. Анализ материалов расследования аварии центра массового отдыха «Аквапарк» в г. Москве. – Вологодские чтения – 2005, №48. – С. 33-36.
4. *Оксанович Л.В.* Невидимый конфликт / Под ред. Ю.М. Веллера. – М.: Стройиздат, 1981. – 191 с.
5. *Карякин Н.И., Быстров К.Н., Киреев П.С.* Краткий справочник по физике. – М.: Высшая школа, 1964. – 574 с.
6. *Минаев В.А., Фадеев А.О.* Функция управления геодинамической безопасностью территориальных социально-экономических систем // Цивилизации знаний: глобальный кризис и инновационный выбор России. Труды 10-й Международной научной конференции. – М.: РосНОУ, 2009. – С. 304-308.
7. *Дюрелли А., Холл Дж., Стерн Ф.и др.* Экспериментальная механика. Кн. II. – М.: Мир, 1990. – 552 с.
8. *Невиль А.М.* Свойства бетона. – М.: Изд-во литературы по строительству, 1972. – 344 с.
9. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теория упругости. – М.: Наука, 1987. – 246 с.
10. Танец над Волгой // Вестник МЧС. Т. 27, №5. – 2010. – С. 54-56.

Статья поступила в редакцию 8 декабря 2010 г.

UDC 699.842+539.1

FATIGUE FAILURE OF CONCRETE STRUCTURES EXPOSED BY DYNAMIC EFFECTS: NUMERICAL MODEL OF THE PROCESS AND METHODS OF PREVENTION

Moe Wai Yan Oo, N.N. Ostroukhov

«МАТИ» – Russian State University of Aviation Technology

Analytical and theoretical verification of the hypothesis of a significant effect on the fatigue strength of thin-walled concrete elements of building structures, which is relatively weak dynamic effects of different origin (wind, acoustic, seismic, etc.) is performed.

The destruction of the elements seen as a process of structural defects in concrete.

A computational model for determining the endurance limit of elements of a particular configuration is proposed.

Key words: *numerical model, concrete buildings, defects of structure, fracture, dynamic forces.*

Moe Wai Yan Oo – Postgraduate student.

Nikolay N. Ostroukhov – Associate professor.