



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

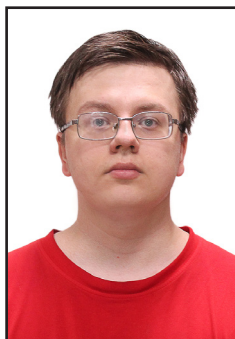
УДК 621.86

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-5-12>

Исследование характера нагружения металлоконструкций башенного крана



Любовь СЛАДКОВА



Филипп КУЗНЕЦОВ

*Любовь Александровна Сладкова¹,
Филипп Александрович Кузнецов²*

*^{1, 2} Российский университет транспорта, Москва,
Россия.*

✉ ¹ rich.cat2012@yandex.ru.

АННОТАЦИЯ

Проведённый анализ аварийности крановых конструкций свидетельствует о том, что одной из самых распространённых причин аварий башенных кранов является ветровая нагрузка. Учёт ветровой нагрузки на крановые конструкции проводится в рабочем и нерабочем состояниях. В рабочем состоянии учитывается предельная ветровая нагрузка, при которой обеспечивается эксплуатация крана с номинальным грузом. В нерабочем состоянии расчёт проводится с учётом коэффициента, учитывающего изменение динамического давления в зависимости от высоты расположения от поверхности земли данного элемента конструкции в нерабочем и рабочем состояниях крана. Однако в нормативных документах, как правило, не учитывается случайный характер действия ветровой нагрузки, хотя материалы исследований изменения скорости ветра (порывов), приведённые в научнотехнической литературе, свидетельствуют о периодичности их действия.

Цель исследования: изучить характер нагружения конструкций башенного крана, что позволит оценить изменение колебательного процесса в элементе металлоконструкции крана от действия ветровой нагрузки.

Ключевые слова: транспортное строительство, нагружение металлоконструкций, башенный кран, ветровая нагрузка, нагруженность, колебательный процесс.

В предлагаемой в статье расчётной схеме были учтены изменение интенсивности ветровой нагрузки по высоте крана и случайный характер её изменения, которые в совокупности ведут к возникновению продольных, крутильных и изгибных колебаний. Колебания металлоконструкции крана рассматривались авторами как колебания осциллятора с заданными параметрами амплитуды колебаний, массами системы (стрела и башня), весом поднимаемого груза. При этом учитывалось механическое состояние системы: жёсткость и упругость.

Теоретические исследования рассматриваемой системы проводились в двух вариантах: 1) как упруговязкая среда; 2) как континуальная система.

Полученные результаты позволили выявить физическую природу колебательного процесса и провести количественную оценку изменения нагружения металлоконструкций башенного крана.

Проведённые теоретические исследования позволили получить выражение, позволяющее оценить изменение колебательного процесса в элементе металлоконструкции крана от действия ветровой нагрузки, носящей случайный характер нагружения.

Для цитирования: Сладкова Л. А., Кузнецов Ф. А. Исследование характера нагружения металлоконструкций башенного крана // Мир транспорта. 2021. Т. 19. № 5 (96). С. 100–104. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-5-12>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Башенные краны широко используются в транспортном строительстве при возведении объектов инфраструктуры.

При этом по статистике Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору Российской Федерации¹ наибольшее число аварий, связанных с грузоподъемной техникой, приходится именно на башенные краны. Например, за 2020 год при эксплуатации всех видов грузоподъемных сооружений было зафиксировано 53 аварии, из них наибольшее число случаев (11) пришлось на башенные краны. В результате погибло семь человек. По данным автора [1, с. 1] эта цифра составляет 82 %.

Самой распространённой причиной аварий башенных кранов является ветровая нагрузка. По данным Американского национального института стандартов (The American National Standards Institute (ANSI)), в десятилетний период с 2000 по 2010 год в мире произошло 1125 аварий с башенными кранами, в которых смертельные травмы получили 780 человек, 23 % этих аварий были вызваны высокой ветровой нагрузкой². На учёт фактора ветровой нагрузки для обеспечения безопасных условий работы указывают не только производители кранового оборудования, но и эксплуатанты техники, важность данного фактора подчёркивает сформировавшаяся ниша производителей специальной аппаратуры, обеспечивающей оповещение об опасном повышении значений скорости ветра³.

В России учёт ветровой нагрузки регламентирован ГОСТ 1451-77⁴ при расчёте металлических конструкций и механизмов, тормозов, при определении мощности двигателей, собственной и грузовой устойчивости крана. За ветровую нагрузку на кран в рабочем состоянии принимается предельная ветровая нагрузка, при которой обеспечивается эксплуатация крана

с номинальным грузом. В нерабочем состоянии расчёт проводится с учётом коэффициента, учитывающего изменение динамического давления в зависимости от высоты расположения от поверхности земли данного элемента конструкции в нерабочем и рабочем состояниях крана. Имеются международные и национальные нормы в других странах, например, в Австралии для мобильных кранов применяются стандарты AS 1418.5 и EN 13000 [2].

Тот же автор отмечает экономический эффект от правильного выбора модели крана, исходя из допустимой для неё ветровой нагрузки. Проведённые в одной из точек наблюдения показали, что использование крана, рассчитанного на ветровую нагрузку в 20 м/с, вместо крана с допустимым значением 12 м/с в течение года позволяет увеличить продолжительность рабочего времени на 342 % [2].

Существующая практика наблюдений за изменениями скорости ветра показывает, что она носит случайный характер изменения [3], что неизбежно приведёт к изменению нагружения элементов металлоконструкции крана [4]. В работе [5, с. 44–46] была отмечена среднестатистическая периодичность изменения ветрового порыва, равная 55–65 с, хотя другие материалы исследований [6, с. 32], проведённых в России и за рубежом, в среднем показывают 0,5–5 с, то есть данные отличаются на порядок.

По результатам более поздних исследований [5, с. 44–46], частота воздействия ветра на элемент конструкции будет равна 0,0182–0,0154 с⁻¹. Такой разброс не может не привести к изменению продольных, поперечных и крутильных колебаний металлоконструкции башенного крана. В результате внутренние усилия в рассматриваемых металлоконструкциях будут носить изгибные, крутильные и продольные колебания (см. рис. 1). Учитывая влияние на металлоконструкцию башенного крана как на систему от периодически возникающего порыва ветра и металлоконструкцию крана, представляющую собой систему, состоящую из стрелы, башни и груза, видно, что действие колебаний от веса поднимаемого, опускаемого или закреплённого груза, не исключает факт вхождения конструкции в околорезонансное состояние.

Для проверки данной гипотезы была поставлена *цель* исследовать колебательный процесс в конструкции крана и с помощью *методов* системного анализа и дифференциальных уравнений выявить характер колебательного процесса.

¹ Годовой отчёт о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2019 году. – М.: НТЦ «Промышленная безопасность», 2020.

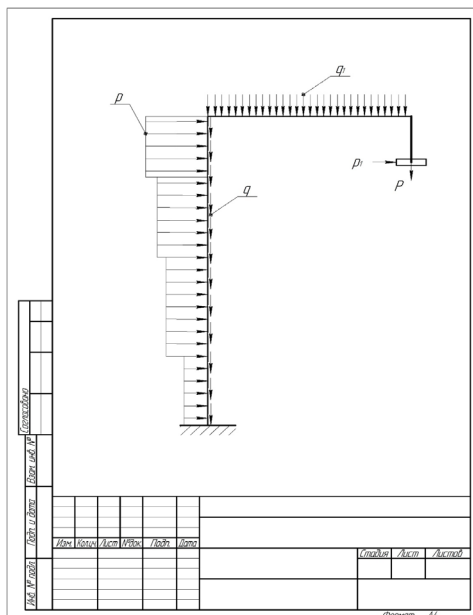
² Wind Conditions and Crane Safety. [Электронный ресурс]: <https://www.windcrane.com/anemometer-wind-crane>. Доступ 25.04.2021.

³ Zajicek, C. Effect of Wind Speed on Cranes. [Электронный ресурс]: <https://www.cranewarningsystemsatlanta.com/post/effect-of-wind-speed-on-cranes>. Доступ 25.04.2021.

⁴ ГОСТ 1451-77 Краны грузоподъемные. Нагрузка ветровая. Нормы и метод определения. – М.: Госстандарт СССР, 1977. – 19 с.



Рис. 1. Нагрузки, действующие на кран (согласно ГОСТ 1451-77).



Нужно отметить наличие исследований, посвящённых описанию моделей воздействия ветровой нагрузки на операции, совершаемые кранами, в частности, на груз, переносимый поворотным автокраном [7].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим нагрузки, действующие на кран в первом приближении (см. рис. 1). Здесь q и q_1 – распределённая нагрузка от силы тяжести башни и стрелы, соответственно, Н; p и p_1 – давление ветра на башню и груз, соответственно, Н/м²; P – вес поднимаемого груза, Н.

При этом необходимо учитывать изменение интенсивности ветровой нагрузки по высоте крана и случайный характер её изменения. Её действие в совокупности с грузовыми характеристиками ведёт к возникновению продольных, крутильных и изгибных колебаний.

Колебания любой механической системы можно представить в виде колебаний осциллятора [8, с. 125; 5, с. 76].

Используя методику расчёта колебательных систем [10, с. 127], запишем колебания стрелы в виде дифференциального уравнения. Колебания стрелы:

$$m \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} + h \cdot \frac{dy}{dt} + k \cdot y = f(t), \quad (1)$$

где y – амплитуда колебаний;

m – масса системы;

h – вязкость конструкции (коэффициент трения, пропорциональный скорости), который является аналогом упругости;

k – коэффициент жёсткости.

В соответствии с решением Эйлера [11, с. 282], общее решение уравнения (1) будем искать в виде:

$$y = c_1 \cdot y_1(t) + c_2 \cdot y_2(t), \quad (2)$$

где c_1 и c_2 – постоянные интегрирования.

Составим характеристическое уравнение:

$$m \cdot r^2 + h \cdot r + k = 0.$$

Тогда уравнение (2) примет вид:

$$y = c_1 \cdot e^{i\omega t} + c_2 \cdot e^{-i\omega t} = r \cdot \cos(\omega t + \varphi). \quad (3)$$

Решение будем искать, используя полную энергию системы (кинетическую и потенциальную) [6, с. 321]:

$$E = \frac{m \cdot v^2}{2} + \frac{k \cdot y^2}{2} = \frac{1}{2} \cdot \left[m \cdot \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 + k \cdot y^2 \right]. \quad (4)$$

Частота колебаний равна:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (5)$$

Подставив (3) в (4), получим, что полная энергия системы будет равна:

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \omega^2 \cdot r^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t + \varphi) + \frac{1}{2} \cdot k \cdot r^2 \cdot \cos^2(\omega \cdot t + \varphi) = \frac{1}{2} \cdot k \cdot r^2 = \text{const}.$$

Учитывая упругость системы и используя (1) и (4), исследуем изменение полной энергии системы во времени путём дифференцирования уравнения (4).

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dt} &= \frac{1}{2} \cdot \left[2 \cdot m \cdot \frac{dy}{dt} \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} + 2 \cdot k \cdot y \cdot \frac{dy}{dt} \right] = \\ &= \frac{dy}{dt} \cdot \left(-h \cdot \frac{dy}{dt} - k \cdot y \right) + k \cdot y \cdot \frac{dy}{dt} = -h \cdot \left(\frac{dy}{dt} \right)^2. \end{aligned}$$

Полученный в результате знак « $\leftarrow$ » свидетельствует о затухании колебательного процесса в системе. Однако действие следующего порыва ветра неизбежно приведёт к суммированию колебаний, что может стать причиной её околорезонансного явления.

Решение вышеприведённого уравнения будет иметь вид [11, с. 326]:

$$y = c_1 \cdot e^{-at} + c_2 \cdot e^{-bt},$$

где a и b – корни характеристического уравнения.

Для определения коэффициентов c_1 и c_2 зададимся начальными условиями:

$$y|_{t=t_0} = y_0; \quad \frac{dy}{dt}|_{t=t_0} = v_0.$$

В случае если дискриминант характеристического уравнения удовлетворяет условию $D > 0$, то используя начальные условия, получим:

$$c_1 = \frac{b \cdot y_0 + v_0}{b - a} \cdot e^{at_0};$$

$$c_2 = \frac{a \cdot y_0 + v_0}{a - b} \cdot e^{bt_0}.$$

Рассмотрим схему, приведённую на рис. 1, как континуальную систему. Считаем, что полная энергия системы:

$$u = u_{\text{упр}} + u_{\text{внеш}} \quad (6)$$

где $u_{\text{упр}} = P \cdot \Delta l$.

Суммарное удлинение складывается из удлинений i -ых участков:

$$\Delta l_i = \frac{(y_{i+1} - y_i)^2}{2 \cdot h}, \quad (6^*)$$

где h – интервал варьирования.

Тогда:

$$u_{\text{упр}} = \frac{P}{2 \cdot h} \cdot \sum_{i=1}^n (y_{i+1} - y_i)^2, \quad (7)$$

$$u_{\text{внеш}} = - \sum_{i=1}^n F_i \cdot y_i. \quad (8)$$

Подставив (7) и (8) в (6), получим:

$$u = \frac{P}{2 \cdot h} \cdot \sum_{i=1}^n (y_{i+1} - y_i)^2 - \sum_{i=1}^n F_i \cdot y_i. \quad (9)$$

При равновесии системы в фиксированный промежуток времени (9) имеем:

$$\frac{\partial u}{\partial y_i} = 0. \quad (10)$$

А при отсутствии равновесия:

$$\frac{\partial u}{\partial y_i} \rightarrow \min, \quad (11)$$

т.е. необходима компенсирующая сила, возвращающая систему в положение равновесия. Правую часть уравнения (9) представим в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial y_i} &= \frac{P}{2 \cdot h} \cdot [2 \cdot (y_i - y_{i-1}) - 2 \cdot (y_{i+1} - y_i)] - F_i = \\ &= - \frac{P}{h} \cdot (y_{i+1} - 2 \cdot y_i + y_{i-1}) - F_i. \end{aligned}$$

В условиях стационарности:

$$\frac{P}{h} \cdot (y_{i+1} - 2 \cdot y_i + y_{i-1}) + F_i = 0. \quad (12)$$

Составим уравнение для двух соседних точек ($F_i = F$):

$$y_i = - \frac{(i-1) \cdot i}{2} \cdot \frac{h \cdot F}{P} + i \cdot y_1. \quad (13)$$

При $y_n = 0$ имеем:

$$y_i = - \frac{(n-1) \cdot i \cdot h \cdot F}{2 \cdot P}, \quad i = 1, 2, \dots, (n-1).$$

Очевидно, что в выражении (6*) величина:

$$\frac{y_{i+1} - y_i}{h} = y'.$$

Тогда (6*) перепишем в виде:

$$u_{\text{упр}} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{P}{2} \cdot y'^2 - f_y \right] \cdot h = \sum_{i=1}^n \left[\frac{P}{2} \cdot y'^2 - f_y \right] \cdot \Delta x.$$

При $h \rightarrow 0$ получим:

$$P \cdot y'' + f(x) = 0.$$

Или:

$$y'' = - \frac{1}{P} \cdot f(x). \quad (14)$$

Используя начальные условия, при $y(0) = 0$; $y(l) = 0$ функция $f(x) = f_0 = \text{const}$, тогда уравнение (14) будет иметь вид:

$$y' = - \frac{f_0}{P} \cdot x + c_1;$$

$$y = - \frac{f_0}{P} \cdot \frac{x^2}{2} + c_1 \cdot x + c_2.$$

С учётом начальных условий:

$$c_2 = 0;$$

$$c_1 = \frac{f_0}{P} \cdot \frac{l}{2}.$$

Откуда искомая функция будет иметь вид:

$$y = \frac{f_0 \cdot x \cdot (l - x)}{2 \cdot P}.$$

В случае действия упругой силы на преодоление сил упругости затрачивается работа:

$$\sum_0^y (k \cdot y) dy = \sum \frac{k \cdot y_i^2}{2},$$

где k – коэффициент упругости.

Тогда выражение (6) будет иметь вид:

$$u = \frac{P}{2 \cdot h} \cdot \sum_{i=1}^n (y_{i+1} - y_i)^2 + \frac{k}{2} \cdot \sum_{i=1}^n y_i^2 - \sum_{i=1}^n F_i \cdot y_i. \quad (15)$$

Однако учитывая расчётную схему башенного крана, состояние последнего в случае нагружения изменяется двумя параметрами x и y , которые изменяются во времени взаимосвязанными функциями вида:



$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t). \end{cases} \quad (16)$$

Изменение этих функций во времени происходит со скоростью:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = P(x, y) \\ \frac{dy}{dt} = Q(x, y). \end{cases} \quad (17)$$

Начальные условия для решения системы дифференциальных уравнений (17) определим из условия равновесия системы – упругой деформации, т.е.:

$$\begin{aligned} y|_{t=0} &= y_0; \dot{x}|_{t=0} = x_0; \\ \dot{y}|_{t=0} &= 0; \dot{x}|_{t=0} = 0, \end{aligned}$$

т.е.:

$$\begin{cases} P(x_0, y_0) = 0 \\ Q(x_0, y_0) = 0. \end{cases}$$

При ветровой нагрузке перемещение точек системы будет равно:

$$\begin{cases} x(t_0) = x_0 + \Delta x_0 \\ y(t_0) = y_0 + \Delta y_0. \end{cases} \quad (18)$$

Подставим (18) в (17):

$$\begin{cases} \frac{d(\Delta x)}{dt} = P(x_0 + \Delta x, y_0 + \Delta y) = (P'_x)_0 \cdot \Delta x + (P'_y)_0 \cdot \Delta y \\ \frac{d(\Delta y)}{dt} = Q(x_0 + \Delta x, y_0 + \Delta y) = (Q'_x)_0 \cdot \Delta x + (Q'_y)_0 \cdot \Delta y. \end{cases} \quad (19)$$

Характеристическое уравнение системы имеет вид:

$$\begin{vmatrix} (P'_x)_0 - p & (P'_y)_0 \\ (Q'_x)_0 & (Q'_y)_0 - p \end{vmatrix} = 0.$$

При мнимых $p = r + i \cdot s$ решение системы имеет вид:

$$ept = ert \cdot (\cos st + i \cdot \sin st). \quad (20)$$

Анализ уравнения (20) показывает, что нарастание или затухание колебаний определяется знаком корня характеристического уравнения p , если p – вещественный корень, и знаком r , если p – мнимое.

Очевидно, что если хотя бы один корень уравнения равен 0, то уравнение (20) будет иметь вид:

$$e^{-at} = 1.$$

То есть объект неподвижен и находится в состоянии равновесия, что в реальности невозможно.

ВЫВОДЫ

Проведённый анализ показал, что в существующих в России нормативных документах, регламентирующих расчёт крановых конструкций, не учитывается случайный характер ветровой нагрузки.

Проведённые теоретические исследования позволили получить выражение (20), позволяющее оценить изменение колебательного процесса в элементе металлоконструкции крана от действия ветровой нагрузки, носящей случайный характер нагружения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тарасова Т. В. Исследование устойчивости башенных кранов при воздействии ветровых нагрузок // Современные научные исследования и инновации. – 2016. – № 6. [Электронный ресурс]: <http://web.snauka.ru/issues/2016/06/68604>. Доступ 25.04.2021.
2. Edwards, S. The effects of wind on crane operation. [Электронный ресурс]: <https://www.cranesandlifting.com.au/the-effects-of-wind-on-crane-operation/>. Доступ 25.04.2021.
3. Jeng, Shyr Long; Yang, Chia Feng; Chieng, Wei Hua. Outrigger force measure for mobile crane safety based on linear programming optimization. Mechanics Based Design of Structures and Machines, 2010, Vol. 2 (38), pp. 145–170. DOI: 10.1080/15397730903482702.
4. Korytov, M. S., Sorokin, V., Titenko, V. V., Belyakov, V. E. Study of the crawler crane stability affected by the length of compensating ropes and platform rotation angle in the mode of movement with payload. Journal of Physics Conference Series, 2020. DOI: 10.1088/1742-6596/1546/1/012135.
5. Мишин А. В. Обеспечение устойчивости башенных кранов при ветровых воздействиях // Дис... канд. техн. наук. – М.: МИИТ, 2014. – 169 с.
6. Рекомендации по уточнённому динамическому расчёту зданий и сооружений на действие пульсационной составляющей ветровой нагрузки. – Введ. 1999-15-12.
7. Cekus, D., Kwiaton, P. Impact of Wind on the Movement of the Load Carried by Rotary Crane. Applied Sciences, 2019, Vol. 9, pp. 21–22. DOI: <https://doi:10.3390/app9183842>.
8. Вибрации в технике: Справ.: в 6 т. – Т. 3. Колебания машин, конструкций и их элементов / Под ред. Ф. М. Диментберга, К. С. Колесникова. – М.: Машиностроение, 1980. – 544 с.
9. Лазарян В. А. Динамика транспортных средств: Избранные труды. – Киев: Наукова думка, 1985. – 528 с.
10. Тарг С. М. Краткий курс теоретической механики. – М.: Машиностроение, 2010. – 416 с.
11. Фихтенгольц Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления: в 3 т. Том II / Пред. прим. А. А. Флоринского. – 8-е изд. – М.: Физматлит, 2001. – 864 с.

Информация об авторах:

Сладкова Любовь Александровна – доктор технических наук, профессор Российского университета транспорта, Москва, Россия, rich.cat2012@yandex.ru.

Кузнецов Филипп Александрович – аспирант кафедры путевых, строительных машин и робототехнических комплексов Российского университета транспорта, Москва, Россия, odevmaltkun@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 25.04.2019, одобрена после рецензирования 26.03.2021, актуализирована 20.09.2021, принята к публикации 15.10.2021.