

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ КОЗЛОВОГО КРАНА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК

Таровик Н. Г.

Составлена расчетная схема нагрузок на козловой кран с учетом воздействия ветровой нагрузки. Расчетная схема крана с грузом, как материальная система с пятью степенями свободы, представлена в прямоугольной системе координат, которые непосредственно характеризуют параметры рабочего процесса крана. Ветровая нагрузка представлена в виде суммы двух ее составляющих: статической и динамической. Полученная математическая модель работы козлового крана в условиях ветра может быть применена для повышения эффективности использования козловых кранов при ветровых нагрузках, а также сформулировать рекомендации по регулировке тормозов механизмов передвижения, противоугонным устройствам и выбору ветроизмерительных приборов.

Складена розрахункова схема навантажень на козловий кран з урахуванням впливу вітрового навантаження. Розрахункова схема крана з вантажем, як матеріальна система з п'ятьма ступенями свободи, представлена в прямокутній системі координат, які безпосередньо характеризують параметри робочого процесу крана. Вітрове навантаження представлено у вигляді суми двох його складових: статичної та динамічної. Отримана математична модель роботи козлового крана в умовах вітру може бути застосована для підвищення ефективності використання козлових кранів при вітрових навантаженнях, а також сформулювати рекомендації з регулювання гальм механізмів пересування, протиугінних пристроїв і вибору вітровимірювальних приладів.

Compiled design scheme for a trestle crane loads, taking into account the impact of the wind load. Design scheme crane with cargo as a material system with five degrees of freedom, represented in a Cartesian coordinate system, which directly characterize the parameters of the working process of the crane. Wind load is represented as the sum of its two components: static and dynamic. The resulting mathematical model of gantry crane in the wind conditions can be applied to improve the efficiency of the use of gantry cranes under wind loads, as well as to formulate recommendations on adjusting the brake mechanisms of movement, anti-theft devices and selection vetroizmeritelyh devices.

Таровик Н. Г.

ассистент каф. ОПМ ДГМА
hypernick@mail.ru

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

УДК 621.873.135

Таровик Н. Г.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ КОЗЛОВОГО КРАНА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК

В настоящее время развитие специальных кранов характеризуется созданием образцов машин большой грузоподъемности, являющихся крупными инженерными сооружениями. Современные порты, причалы которых предназначены для приема и обработки судов, оборудуются специальными кранами, т. н. причальными перегружателями. Ветровая нагрузка для таких кранов является важным фактором, определяющим их работоспособность, безопасность и эффективность эксплуатации.

Анализ нормативных документов по ветровым нагрузкам, исследований в области воздействия ветра на сооружения, а также практического состояния дел по расчету и эксплуатации кранов, работающих в условиях ветра, позволяет применительно к специальным кранам сделать следующие выводы:

- существующие нормы расчета ветровых нагрузок носят общекрановый характер. Они не учитывают в необходимой степени надежность и свойства конкретных конструкций кранов, особенностей их эксплуатации и геометрических условий региона их установки;
- не имеется рекомендаций по безопасной эксплуатации кранов при различном характере действия ветра, а также по устройствам, снижающим неблагоприятные воздействия ветра на краны.

Изложенное позволяет говорить об актуальности, как в практическом, так и научном отношении исследований влияния ветровой нагрузки на работоспособность козловых кранов большой грузоподъемности, обеспечивающих теоретическую базу для разработки научно обоснованных рекомендаций по их проектированию, расчету и безопасной эксплуатации.

Расчет козловых кранов общего назначения на ветровую нагрузку проводится в соответствии с ГОСТ 1451-77 [1]. При этом учитывается только статическая составляющая ветровой нагрузки. Вместе с тем методика расчета динамической составляющей, принятая для башенных кранов, не применима к козловым кранам общего назначения из-за их специфических конструктивных особенностей. Вопросы работы порталных кранов в условиях ветра рассмотрены в работах Подобеда В. А. [2, 3]. Моделирование движения козлового крана при действии ветра осуществляем на основе математических моделей, разработанных профессором Ерофеевым Н. И. [4] путем введения в них функций ветровой нагрузки.

Целью работы является совершенствование методов расчета козловых кранов при ветровых нагрузках.

Движение крана характеризуется траекторией точки подвеса груза, расположенной на грузовой тележке. Координатами этой точки в данном случае будут декартовы x , y и z . Эти координаты являются основными, так как они определяют главные геометрические параметры рабочего процесса перемещения точки a подвеса груза. Груз подвешен на гибкой связи (канате), которая отклоняется в пространстве на угол α в результате ускорения. Причины ускорения различны: пуск или торможение крана, порыв ветра. По этой причине координатами груза в пространстве будут: x_a , y_a и z_a . Уравнения движения точки a и груза выразятся через все эти координаты как функции времени. Указанные координаты характеризуют степени свободы крана.

Кран, как и любое деформируемое тело, является системой с бесчисленным количеством степеней свободы. При упругих деформациях элементов крана происходят отклонения основных координат от истинных значений в виде дополнительных перемещений точки подвеса груза.

Число перемещений соответствует числу основных координат. Далее координаты будут дополнены вследствие упругих смещений в звеньях привода, упругого удлинения каната, просадки пути и т.д. Такие факторы как ветер, осадки, температура могут также оказать влияние на положение элементов крана.

В общем случае система крана с грузом будет иметь около 30 степеней свободы. Система уравнений, описывающая движение точки a , выраженная через такое количество координат, будет весьма громоздка. Пользоваться такой системой затруднительно. Поэтому, в зависимости от решаемой задачи, мы будем ограничивать число степеней свободы. При этом вводим следующие допущения:

- пренебрегаем массами некоторых элементов крана, например, канат, захват и т.п.;
- рассматриваем ряд элементов как абсолютно твердые тела, например, основание, платформа.

В результате система кран и груз будет иметь приемлемое конечное число степеней свободы. Степенями свободы точки подвеса груза и его самого у козлового крана будут 6 основных координат

$$q_i = x, y, z, x_\alpha, y_\alpha, z_\alpha,$$

а в ряде случаев работы $z = \text{const}$ и количество основных координат q_i сокращается до пяти.

Универсальный метод решения широкого круга задач динамики разработан Лагранжем в виде уравнения второго рода, которые составляются на основе понятия обобщенных координат и соответствующих им обобщенных сил.

Получение математической модели движения козлового крана производится в следующей последовательности:

- составляется расчётная схема крановой динамической системы с независимыми обобщенными координатами и внешними нагрузками;
- определяется число степеней свободы a , следовательно, обобщенных координат динамической системы;
- соответственно обобщенным силам определяются обобщенные силы на возможных перемещениях либо обобщенная сила определяется как частная производная от потенциальной энергии системы по соответствующей координате;
- вычисляется кинетическая энергия системы;
- определяются частные производные от кинетической энергии системы по производным обобщенных координат и находятся их производные по времени;
- вычисляются частные производные от кинетической энергии системы по обобщенным координатам;
- производятся преобразования и составляются системы дифференциальных уравнений, которые решаются согласно условиям задачи.

Ветровая нагрузка на элемент конструкции крана рассчитывается по формуле

$$F_g = qk \cdot cA, \quad (1)$$

где q – динамическое давление ветра; k – коэффициент, учитывающий изменение динамического давления по высоте; c – коэффициент аэродинамической силы; A – расчётная площадь элемента.

В формуле (1) величины c и A принимаются по соответствующим координатам.

При расчётах усилие F_g чаще приводится к точке подвеса груза a . Преобразуем формулу (1) к виду, удобному для практического использования

$$F_g = K_\partial \cdot c \cdot K_a \cdot V^2 A, \quad (2)$$

где K_∂ – коэффициент приведения скорости ветра в величину динамического давления ветра;

K_a – коэффициент приведения усилия от силы ветра к точке подвеса груза.

Скорость ветра можно представить в виде суммы статической составляющей и динамической, являющейся функцией времени

$$V(t) = \bar{V} + \Delta V(t), \quad (3)$$

где \bar{V} – статическая составляющая скорости ветра, соответствующая средней скорости (величина векторная);

$\Delta V(t)$ – динамическая составляющая скорости ветра, случайная функции ветра.

Динамическая составляющая скорости ветра является случайной функцией. Случайную функцию времени $\Delta V(t)$ можно представить в виде

$$\Delta V(t) = \sum_{i=1}^n L_i \eta_i(t), \quad (4)$$

где L_i – коэффициенты разложения случайной величины;

$\eta_i(t)$ – координатные неслучайные функции.

Применительно к ветровому потоку координатную неслучайную функцию можно представить в виде

$$\eta_i(t) = \sin \omega_i t \quad (5)$$

Тогда формула (3) примет вид:

$$V(t) = \bar{V} + \sum_{i=1}^n \sin \omega_i t \quad (6)$$

где $\omega_i = \frac{2\pi}{\tau_i}$ – круговые частоты порыва ветра;

τ_i – продолжительность порыва ветра.

Выражение для коэффициента порыва ветра можно представить следующим образом:

$$K_{II} = \frac{V_{\max}}{V_{cp}} = \frac{V + \Delta V}{V} \quad (7)$$

Тогда динамическую составляющую ΔV можно выразить как

$$\Delta V = \bar{V} (K_{II} - 1) \quad (8)$$

Используя выражение (8), выражаем через коэффициенты порывистости L .

Формула 6 примет вид:

$$V(t) = \bar{V} \left[1 + \sum_{i=1}^n (K_{IIi} - 1) \sin \omega_i t \right] \quad (9)$$

Подставляя значение скорости ветра как случайную величину в (2), получаем расчетную формулу ветровой нагрузки на элементы конструкции крана

$$F_e = K_D \cdot c \cdot K_a \cdot A \cdot \bar{V}^2 \left[1 + \sum_{i=1}^n (K_{IIi} - 1) \sin \omega_i t \right]^2 \quad (10)$$

где n – число гармоник колебаний скорости ветра.

Составляем расчетную схему козлового крана и определяем число обобщенных координат. Расчетная схема козлового крана и положение гибкого подвеса груза в пространстве представлены на рис. 1 и 2.

Число степеней свободы точки подвеса груза a и самого груза будет равно пяти, а соответствующими им обобщенными координатами будут

$$q_i = x, y, x_\alpha, y_\alpha, z_\alpha,$$

Координата z отсутствует, так как высота точки подвеса груза a в нашем случае $h = z_0 = \text{const}$.

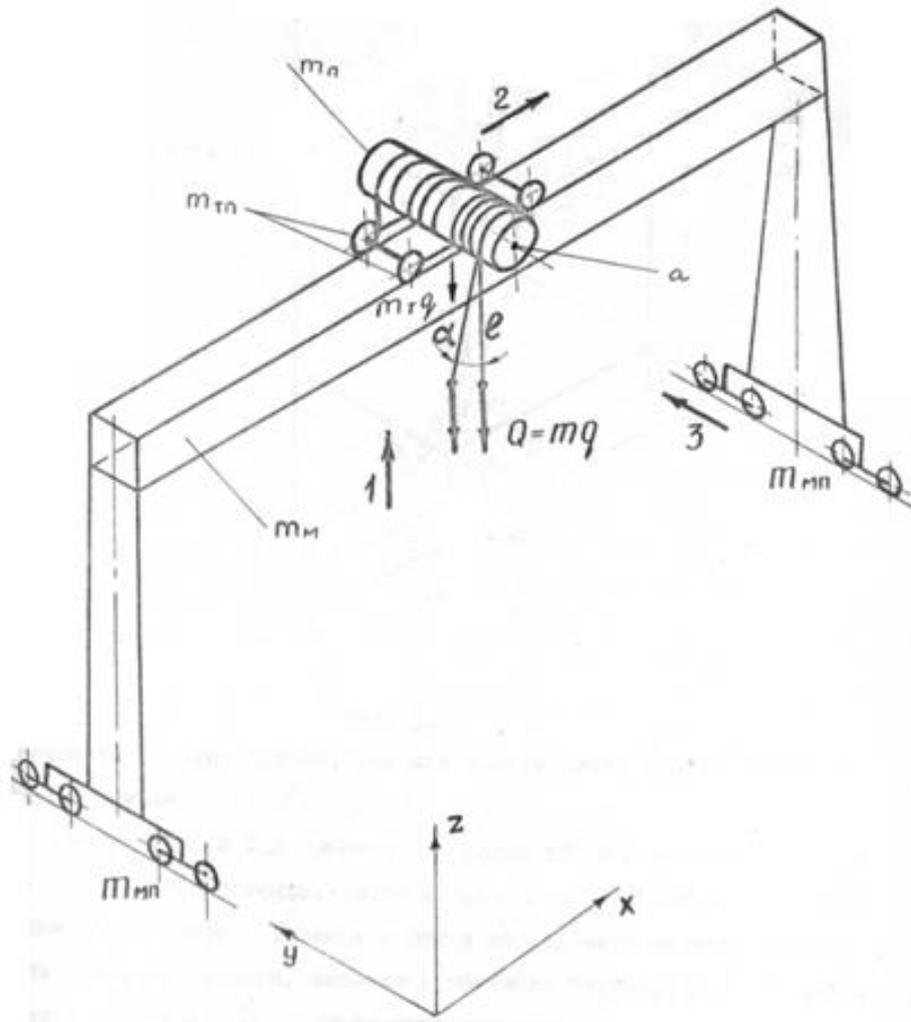


Рис.1. Расчётная схема козлового крана (1, 2, 3 – направление движения соответственно груза, тележки, крана)

На рис. 1 и 2 приняты следующие обозначения: m_T , m_M и m – массы тележки, моста и груза; m_{Tn} , m_{Mn} и m_L – приведенные массы привода тележки к оси и её ходового колеса, привода моста к оси его колеса, лебедки к обечайке барабана; l – длина грузового каната; S – натяжение грузового каната; α – угол отклонения каната от вертикали.

Выразим усилие натяжения грузового каната S_x , S_y , S_z по соответствующим координатам через перемещения по этим координатам и длину каната (см. рис. 2).

$$\begin{aligned} S_1 &= S \cdot \sin \alpha ; \\ S_x &= S_1 \cdot \sin \beta ; \\ S_y &= S_1 \cdot \cos \beta ; \\ S_z &= S \cdot \cos \alpha ; \\ x - x_\alpha &= l \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta ; \\ y - y_\alpha &= l \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta . \end{aligned}$$

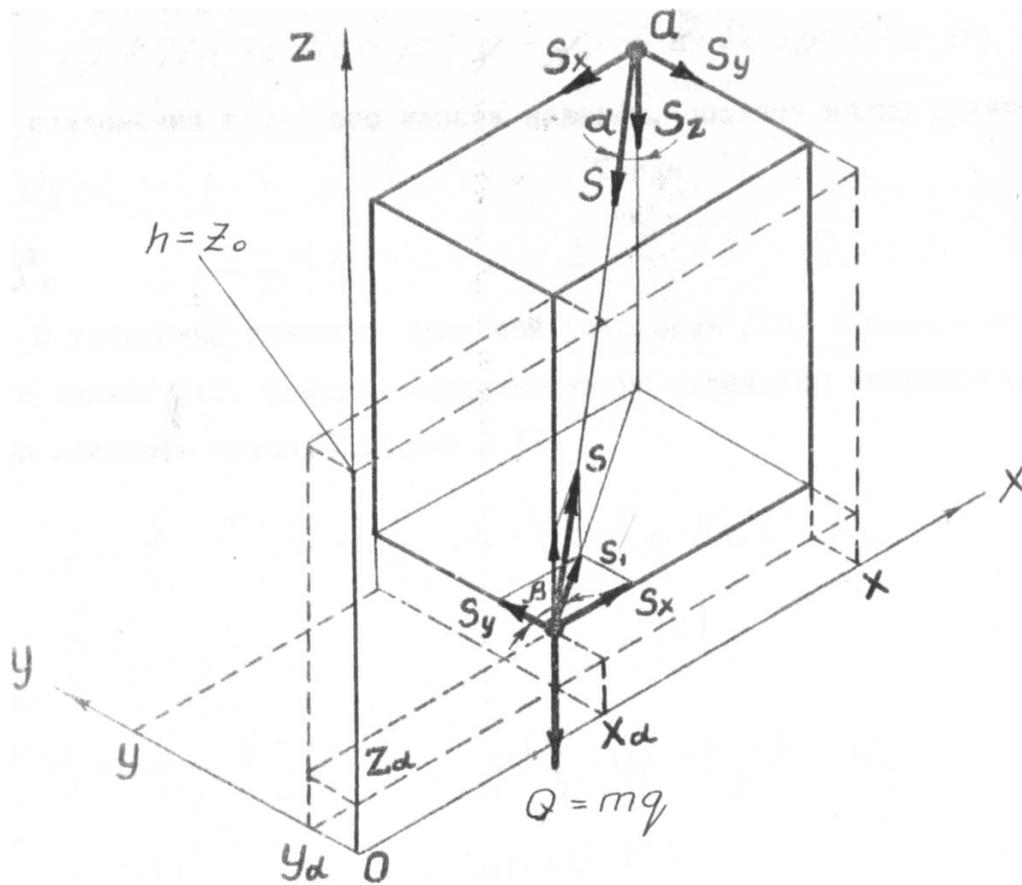


Рис. 2. Положение гибкого подвеса груза в пространстве

Угол отклонения грузового каната невелик, поэтому можно принять
 $\cos \alpha \approx 1$; $\sin \alpha \approx \alpha$.

Тогда

$$S_x = S \frac{x - x_\alpha}{l};$$

$$S_y = S \frac{y - y_\alpha}{l};$$

$$S_z = S.$$

В уравнение движения крановой установки вводим функции вероятностного выражения ветровой нагрузки на элементы крана (10).

Уравнение 1 системы (11) описывает работу механизма передвижения тележки, уравнение 2 – работу механизма передвижения крана, уравнения 3, 4 – вынужденные колебания груза под действием ветровой нагрузки, уравнение 5 – работу механизма подъёма.

$$m_1 = m_T + m_{ТП};$$

$$m_2 = m_M + m_T + m_{МП}.$$

$$\left. \begin{aligned}
 1 \quad \ddot{x} + \frac{S}{m_1} \frac{x - x_\alpha}{l} &= \frac{1}{m_1} \left\{ P_x - W_x - K_\partial \cdot K_\alpha \cdot C_x A_x \bar{V}^2 \left[1 + \sum_{i=1}^n (K_{\Pi i} - 1) \sin \omega_i t \right]^2 \right\}; \\
 2 \quad \ddot{y} + \frac{S}{m_2} \frac{y - y_\alpha}{l} &= \frac{1}{m_2} \left\{ P_y - W_y - K_\partial \cdot K_\alpha C_y A_y \bar{V}^2 \left[1 + \sum_{i=1}^n (K_{\Pi i} - 1) \sin \omega_i t \right]^2 \right\}; \\
 3 \quad \ddot{x}_\alpha - \frac{S}{m} \frac{x - x_\alpha}{l} &= \frac{1}{m} K_\partial \cdot K_\alpha \cdot C_2 A_2 \cdot \bar{V}^2 \left[1 + \sum_{i=1}^n (K_{\Pi i} - 1) \sin \omega_i t \right]^2; \\
 4 \quad \ddot{y}_\alpha - \frac{S}{m} \frac{y - y_\alpha}{l} &= \frac{1}{m} K_\partial \cdot K_\alpha \cdot C_2 A_2 \cdot \bar{V}^2 \left[1 + \sum_{i=1}^n (K_{\Pi i} - 1) \sin \omega_i t \right]^2; \\
 5 \quad \ddot{z}_\alpha &= \frac{1}{m_{\Pi} \cdot n^2 + m} (n \cdot P_l - mg); \quad S = m(g + \ddot{z}_\alpha).
 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где n – кратность полиспафта;

P_x, P_y, P_l – движущие усилия механизмов, приложенные соответственно к осям ходовых колес тележки, моста и к обечайке барабана грузовой лебедки; W_x, W_y – сопротивления движению тележки и моста.

Математическая модель движения козлового крана (11) представляет собой систему пяти нелинейных, неоднородных дифференциальных уравнений второго порядка, правая часть которых содержит случайные функции ветровой нагрузки.

ВЫВОДЫ

Полученная математическая модель работы козлового крана в условиях ветра может быть применена для решения различных задач:

– повышения эффективности использования специальных кранов при ветровых нагрузках: использование кранов при скорости ветра свыше 15 м/с, но в пределах паспортных значений ветровых нагрузок с ограничениями, накладываемыми на технологические схемы перегрузочных работ и парусность грузов;

– определения допустимых ветровых нагрузок на портовые краны в эксплуатационных условиях, учитывающий тип крана, технологическую схему его работы, парусность грузов и векторную природу ветровой нагрузки, защищенность причалов и рабочих участков порта естественными и искусственными препятствиями;

– сформулировать рекомендации по регулировке тормозов механизмов передвижения, противоугонным устройствам, а также по выбору ветроизмерительных приборов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 1451-77. Краны грузоподъемные. Нагрузка ветровая. – М. : Госстандарт, 1978. – 19 с.
2. Подобед В. А. Математическое моделирование ветровых нагрузок на портовые порталные краны / В. А. Подобед // Вестник МГТУ. – 2006. – №2. – С. 318–331.
3. Подобед В. А. Вероятностная оценка устойчивости направления и порывистости ветра / В. А. Подобед, Н. Е. Подобед // Материалы Международной научно-технической конференции «Наука и образование – 2004». – 2004. – С. 241–245.
4. Ерофеев Н. И. Математическая модель режима работы крановых установок / Н. И. Ерофеев // Автоматика и телемеханика. – 1967. – С. 160–166.