

DOI 10.5862/JEST.226.15

УДК 621.86

П.А. Гаврилов

## ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИИ КОЗЛОВЫХ КРАНОВ С УЧЕТОМ МЕСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ

P.A. Gavrilov

## ENGINEERING METHOD OF FORECASTING SEISMIC RESISTANCE OF GANTRY CRANES INCLUDING POSSIBLE LOCAL DAMAGE

В работе рассматривается методика прогнозирования сейсмического отклика металлических конструкций козловых кранов, позволяющая на ранней стадии проектирования оценить возможные повреждения. Изложенная методика основывается на моделировании конструкции козлового крана нелинейной динамической системой. Сравниваются результаты сейсмического анализа по предлагаемой методике и полученные расчетом по методу конечных элементов.

СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ; КРАН КОЗЛОВОЙ; НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА; ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА; МЕСТНЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ.

In this paper the method of forecasting the seismic response of metal structures of gantry and portal cranes is proposed. This simplified method allows to evaluate possible damage of steel structure of the portal. The foregoing procedure is based on the modeling of the structure of the gantry crane using nonlinear dynamic system with element of plasticity. The physically nonlinear element of dynamic system simulates the possible damage of steel structure. The comparison of the results of the seismic analysis using the proposed method and finite element method shows that results match to each other with accuracy higher than 13%. Proposed method may be used for gantry and portal cranes at the early stages of design process.

SEISMIC RESISTANCE; NONLINEAR DYNAMICS; SIMPLIFIED METHOD; PORTAL CRANE; GANTRY CRANE; LOCAL DAMAGE.

### Введение

Предлагаемая работа ориентирована на прогноз сейсмостойкости металлоконструкций козловых кранов общепромышленного назначения, не относящихся к оборудованию объектов повышенной опасности (АЭС, ГЭС и др.), на этапе проектирования. Для грузоподъемных машин данного класса допустимы местные повреждения, не приводящие к потере несущей способности металлической конструкции в целом. Затруднения вызывает то, что сейсмический анализ в соответствии с существующими методиками зачастую использует сложные модели

динамических систем с большим числом степеней свободы, составление которых на первоначальных этапах невозможно в силу того, что ряд параметров конструкции неизвестен. В [1, 2] достаточно полно описана проблема недостаточной сейсмостойкости смонтированной металлической конструкции крана. Следует отметить, что хрупкие разрушения не относятся к местным повреждениям. Они образуются при сочетании нескольких эксплуатационных факторов [3], возникновение которых одновременно с землетрясением можно считать событием маловероятным.



В настоящее время методика расчета сейсмостойкости грузоподъемного оборудования регламентируется нормами [4, 5]. В обоих документах допускается проводить расчет методом прямого численного интегрирования дифференциальных уравнений движения, не прибегая к линеаризации модели для расчета по линейно-спектральной теории сейсмостойкости (ЛСТ), описанной в [6].

В качестве объекта исследования рассматривается металлическая конструкция козлового крана, состоящая из пролетного строения, жесткой и шарнирной опор. Известно, что опасным узлом в конструкции козловых кранов является место соединения жесткой опоры с пролетным строением. При нормальном режиме работы данный узел слабо нагружен, однако при возникновении сейсмических нагрузок, перпендикулярных по направлению к оси крановых путей, могут возникать существенные внутренние усилия и напряжения.

В последние годы все большее внимание уделяется физической и геометрической нелиней-

ностям, которые свойственны конструкциям грузоподъемной техники. Примерами таких нелинейностей являются односторонний контакт колеса с рельсом, проскальзывание колеса вдоль рельса, нелинейная диаграмма деформирования грузовых стальных канатов [7] и др. Методы моделирования подобных нелинейных связей и методы решения систем дифференциальных уравнений движения рассмотрены, в частности, в [8–10]. В настоящей работе рассматривается физическая нелинейность материала металлической конструкции, которая моделирует указанные выше местные пластические деформации.

Целью работы является методика оценки сейсмостойкости металлических конструкций козловых кранов с учетом возможных местных повреждений.

### Описание расчетной модели

Рассмотрим задачу в плоской постановке. Частотный анализ конструкций козловых кранов

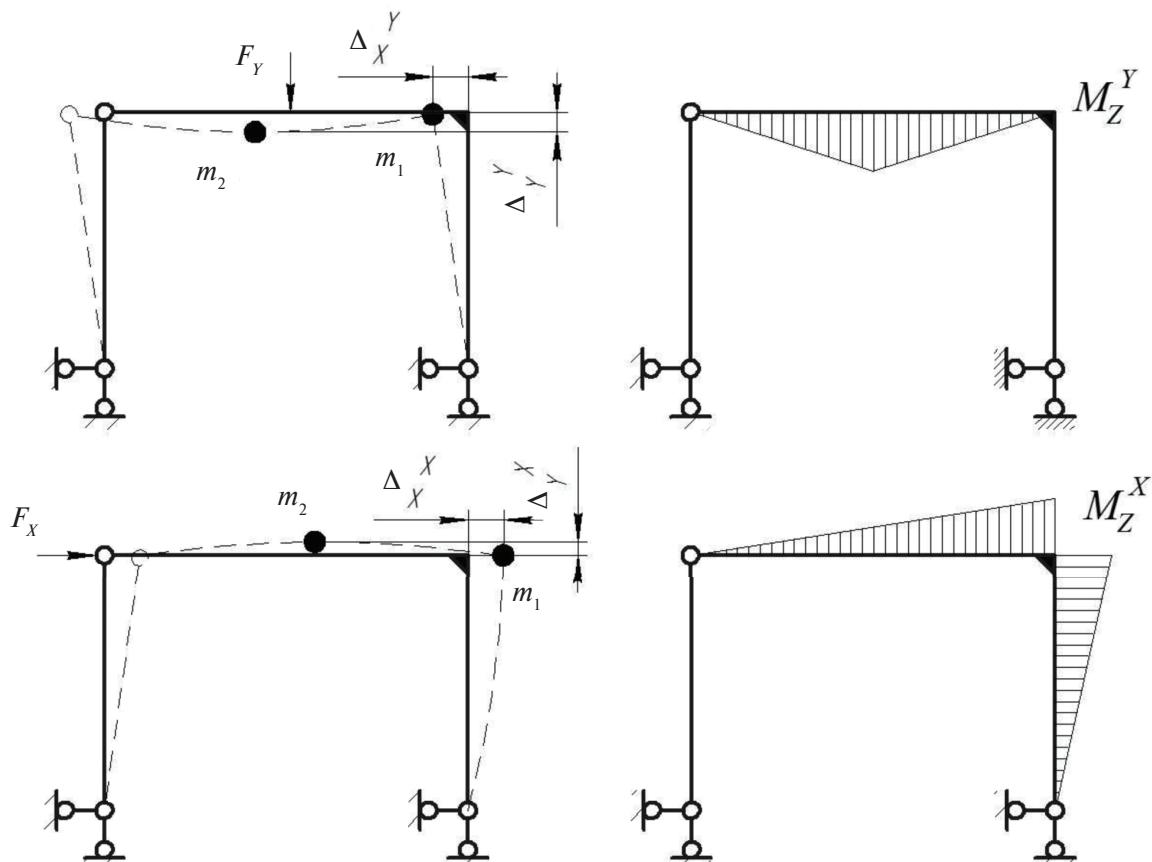


Рис. 1. Виды статического нагружения портала и соответствующие им эпюры изгибающих моментов

показывает, что наибольший энергетический вклад в колебательный процесс рамы портала козлового крана вносят низшие формы собственных колебаний в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Предположим, что такие формы близки к упругим линиям при статическом нагружении конструкции [11] горизонтальной силой в шарнире, в первом случае, и вертикальной силой в центре пролета, во втором случае. Еще в качестве одного предположения примем, что упруго-пластическая деформация происходит без достижения условий хрупкого разрушения. Схемы нагружения, упругих линий и эпюров моментов изображены на рис. 1.

В качестве расчетной динамической модели предложено использовать модель, представленную на рис. 2. На схемах (рис. 1, 2)  $m_1, m_2$  – приведенные массы металлической конструкции козлового крана, при этом масса  $m_1$  совершает колебания только в горизонтальном направлении, а масса  $m_2$  – в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Известно, что горизонтальная инерционная нагрузка  $F_x$ , приложенная к пролетному строению портала, вызывает также вертикальное перемещение точки в центре пролета крана (см. рис. 1) [12]. Аналогично вертикальные нагрузки вызывают горизонтальные перемещения. Если пренебречь продольными упругими деформациями опор и пролетного строения в силу их малости, то сложное движение совершает только приведенная масса  $m_2$ . Угол  $\alpha$  характеризует отношение ортогональных перемещений массы  $m_2$ . В данном случае угол  $\alpha$  может быть определен по формуле

$$\alpha = \arctan \left( \frac{\Delta_x^X}{\Delta_y^X} \right), \quad (1)$$

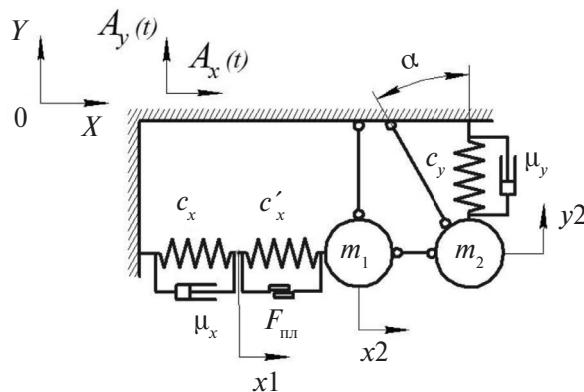


Рис. 2. Схема расчетной динамической модели

где  $\Delta_x^X$  – горизонтальное перемещение центра пролета крана от приложенной горизонтальной силы  $F_x$ ;  $\Delta_y^X$  – вертикальное перемещение той же точки от той же силы (см. рис. 1).

Жесткости пружин  $c_x$  и  $c_y$  могут быть определены как жесткость портала в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Жесткость  $c'_x$  является величиной, характеризующей закритическое поведение системы, когда номинальные напряжения в опасном сечении превышают предел текучести материала:  $\sigma_{\text{ном}} \geq \sigma_t$  (см. ниже). Элемент трения моделирует горизонтальную площадку текучести материала. Данный элемент характеризуется величиной силы  $F_{\text{пл}}$ , равной такому горизонтальному усилию  $F_x$ , при котором номинальные напряжения в опасном сечении равны пределу текучести:  $\sigma_{\text{ном}}(F_{\text{пл}}) \geq \sigma_t$ . Демпфирующие свойства материала портала могут быть определены экспериментально, по аналогии с уже существующими кранами, а также из справочной и нормативной литературы [5].

Сейсмические колебания нелинейной динамической системы могут быть описаны системой уравнений в форме уравнения Лагранжа II-го рода с дополнительным вектором нелинейных усилий [9]:

$$[M]\{\ddot{V}(t)\} + [K]\{\dot{V}(t)\} + [C]\{V(t)\} + \{R(V(t), \dot{V}(t))\} = \{P\}, \quad (2)$$

где  $[M]$ ,  $[K]$ ,  $[C]$  – матрицы масс, демпфирования и жесткости;  $\{V(t)\}$  – вектор перемещений (и его производных по времени);  $\{P\}$  – вектор внешних нагрузок;  $\{R(V(t), \dot{V}(t))\}$  – вектор нелинейных силовых факторов (усилия в демпферах, силы трения заторможенных колес о рельсы и др.)

Система уравнений, описывающая рассматриваемую схему, может быть записана в виде

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = A_x(t); \\ \ddot{Y}(t) = A_x(t); \\ \ddot{y}(t)m_y + c_y(y(t) - Y(t)) + \mu_y(\dot{y}(t) - \dot{Y}(t)) + \\ + \ddot{x}_2(t)m_x \sin(\alpha) = 0; \\ c_x(x_1(t) - X(t)) + \mu_x(\dot{x}_1(t) - \dot{X}(t)) = F(t); \\ \ddot{x}_2(t)m_x + F(t) + \ddot{y}(t)m_y \cdot \cos(\alpha) = 0; \\ F(t) = F_{\text{пл}} \frac{(\dot{x}_2(t) - \dot{x}_1(t))}{\sqrt{(\dot{x}_2(t) - \dot{x}_1(t))^2 + \varepsilon}} + \\ + c'_x(x_2(t) - x_1(t)). \end{cases} \quad (3)$$



Здесь  $X(t)$ ,  $Y(t)$  – перемещения сейсмической массы;  $\mu_x$ ,  $\mu_y$  – коэффициенты эквивалентного вязкого трения, приведенные к соответствующей частоте собственных колебаний системы. Последнее уравнение системы (3) содержит выражение, аппроксимирующее функцию знака  $f(x) = \text{sign}(x)$  как  $f(x) \approx \frac{x}{\sqrt{x^2 + \varepsilon}}$ , где  $\varepsilon$  весьма мало

по сравнению с  $x$ . При такой форме записи функция  $f(x)$  является непрерывной и интегрируемой [13]. Прочие параметры системы рассмотрены ниже.

Величины жесткостей  $c_x$  и  $c_y$  могут быть определены через интеграл Мора:

$$c_x = \left[ \frac{H^2 L}{3EJ_z} \left( 1 + \frac{HJ_z}{J_{\text{экв}} L} \right) \right]^{-1}$$

$$c_y = \left[ \frac{L^3}{48EJ_z} - \frac{L^2 H}{16EJ_z} \cdot \frac{3L}{16H \left( 1 + \frac{HJ_z}{J_{\text{экв}} L} \right)} \right]^{-1}, \quad (4)$$

где  $H$  – высота жесткой опоры;  $L$  – пролет крана;  $E$  – модуль Юнга материала;  $J_z$  – момент инерции основного сечения моста;  $J_{\text{экв}}$  – эквивалентный момент инерции жесткой опоры, равный моменту инерции опоры постоянного сечения той же жесткости, что и у реальной опоры переменного сечения. Определение эквивалентного момента инерции сечения жесткой опоры  $J_{\text{экв}}$  приведено ниже.

Коэффициенты эквивалентного вязкого трения  $\mu_x$  и  $\mu_y$  вычисляются по формуле [14]

$$\mu_{x,y} = \frac{D}{f_{x,y} 2\pi} c_{x,y}, \quad (5)$$

где  $D$  – относительное демпфирование, принимаемое в соответствии с п. 5.11 норм [5];  $f_{x,y}$  – частоты собственных колебаний системы по соответствующим формам. Так как в рассматриваемой системе учитывается закритическое поведение конструкции, а портал козлового крана является сварным, относительное демпфирование следует принимать равным  $D = 4\%$ .

Приведенные массы  $m_x$  и  $m_y$  определим в соответствии с приближенными методиками [11]:

$$m_1 = (M_1 + 0,33M_2);$$

$$m_2 = 0,5M_1,$$

где  $M_1$  – масса пролетного строения портала (сюда может быть включена масса грузовой тележки крана);  $M_2$  – масса жесткой опоры портала.

Таким образом, получена методика прогнозирования сейсмостойкости металлической конструкции козловых кранов, позволяющая оценить возможные повреждения на стадии проектирования.

### Расчет портала козлового крана

В качестве примера рассмотрим кран козловой электрический КК-Кнт 36-25/5/7-12,5-А6, У1 производства КТБ «Технорос» (рис. 3).

Характеристики металлической конструкции крана установлены по проектным данным:

масса половины пролетного строения портала  $M_{\text{пп}} = 35810$  кг;

масса жесткой опоры  $M_{\text{оп}} = 7970$  кг;

момент инерции основного сечения пролетного строения  $J_z = 0,054$  м<sup>4</sup>;

модуль Юнга использованного материала  $E = 210$  ГПа;

пролет крана  $L = 25$  м;

длина жесткой опоры  $H = 14,64$  м.

Жесткая опора крана имеет переменное сечение; в месте присоединения ее к пролетной балке это сечение соответствует основному сечению пролетного строения.

Ширина сечения опоры изменяется от точки пересечения осей моста и опоры до основания следующим образом:

$$b(x) = \begin{cases} 1258 & \text{при } x < 590 \text{ мм;} \\ 0,049(x - 590) + 1258 & \text{при } 590 \leq x < 11617 \text{ мм;} \\ 1800 & \text{при } 11617 \text{ мм} \leq x \leq H. \end{cases} \quad (6)$$

Аналогично задано изменение высоты сечения опоры:



Рис. 3. Кран козловой КК-Кнт 36-25/5/7-12,5-А6

$$h(x) = \begin{cases} 2183 \text{ при } x < 590 \text{ мм;} \\ -0,129(x - 590) + 2183 \text{ при } 590 \leq x < 11617 \text{ мм;} \\ 758 \text{ при } 11617 \text{ мм} \leq x \leq H. \end{cases} \quad (7)$$

Толщины поясов и стенок одинаковы и равны  $d = 8$  мм.

Момент инерции сечения опоры:

$$J_z^{\text{оп}} = \frac{1}{12} \left( b(x)h(x)^3 - (b(x) - 2d)(h(x) - 2d)^3 \right). \quad (8)$$

Для нахождения жесткости опоры определим уравнение эпюры изгибающих моментов от единичной силы, действующей в точке с координатой  $x = 0$  в направлении, перпендикулярном оси опоры:

$$M(x) = 1x.$$

Тогда жесткость опоры определяется по формуле

$$c_{\text{оп}} = \frac{1}{\int_0^H \theta(x)dx} = 4,229 \cdot 10^6 \text{ Н/м}, \quad (9)$$

где  $\theta(x)$  – уравнение углов поворота сечения (определенное методом Мора).

Определим эквивалентный постоянный момент инерции сечения опоры из условия равенства жесткостей:

$$J_{\text{экв}}^{\text{оп}} = \frac{c_{\text{оп}} H^3}{3E} = 0,021 \text{ м}^4. \quad (10)$$

Жесткости  $c_x$  и  $c_y$  портала крана определим по формулам (4):

$$c_x = 2,545 \cdot 10^6 \text{ Н/м}; \quad c_y = 4,521 \cdot 10^7 \text{ Н/м}.$$

Собственные частоты колебаний портала по двум формам определяются по известным формулам:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c_x}{m_1}} = 1,295 \text{ Гц};$$

$$f_2 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c_y}{m_2}} = 7,997 \text{ Гц}.$$

Полученные значения собственных частот колебаний портала сравним с полученными МКЭ при расчете сейсмостойкости исследуемого крана [15]:  $f_1^{\text{МКЭ}} = 1,3 \text{ Гц}$ ;  $f_2^{\text{МКЭ}} = 8,1 \text{ Гц}$ .

Погрешность вычисления собственных частот колебаний оказалась мала: 0,38 и 1,63 % для первых двух частот соответственно. Можно сделать промежуточный вывод о допустимости использования принятых упрощений.

Угол  $\alpha$  определим по формуле (1), используя аналитические выражения для расчета перемещений конструкции [16]. Вычисленное значение угла поворота главных осей данного портала –  $\alpha = 7,318^\circ$ . Та же величина, полученная посредством МКЭ, –  $\alpha^{\text{МКЭ}} = 7,881^\circ$ . Ошибка составила 7 %.

Коэффициенты эквивалентного вязкого трения определяются по формуле (5):

$$\mu_x = \frac{4\%}{f_x 2\pi} c_x = 62,6 \text{ кН};$$

$$\mu_y = \frac{4\%}{f_y 2\pi} c_y = 179 \text{ кН}.$$

Синтез акселерограммы для расчета сейсмостойкости является отдельной инженерной и исследовательской задачей. Подробно методы синтеза исходных воздействий рассмотрены, например, в [17, 18]. В настоящей работе для наглядности прибегнем к упрощенной процедуре синтеза акселерограммы и представим функцию  $A_x(t)$  в виде линейной комбинации синусоидальных вибраций:

$$A_x(t) = \sum_i \beta_i \sin(\pi f_i t), \quad (11)$$

где  $\beta_i$  – коэффициент динамичности, определяемый в соответствии с [4] для  $i$ -й частоты  $f_i$ . Частоты  $f_i$  выбраны таким образом, чтобы вызвать явление резонанса, т. е. две частоты возмущающего воздействия соответствуют вычисленным собственным частотам конструкции. Еще две частоты выбраны произвольным образом:

$$f_1 = f_x; \quad f_2 = f_y; \quad f_3 = f_x (1 + \sqrt{2}); \quad f_4 = \frac{f_y}{3}.$$

Соответствующие данным частотам коэффициенты динамичности [4]:

$$\beta_1 = 1,8; \quad \beta_2 = 2,5; \quad \beta_3 = 2,5; \quad \beta_4 = 2,5.$$

Сейсмическое воздействие на кран задано следующим образом: кинематическое возмущение основания длится 10 секунд, после чего прекращается. Такое входное воздействие дает возможность оценить затухание колебаний и остаточные деформации конструкции.

Диаграмма «нагрузка–перемещение» консольной балки коробчатого сечения при развитии номинальных напряжений выше предела текучести может быть аппроксимирована билинейно. В данной работе допустимым принят такой уровень нагрузки, когда напряжения, равные



пределу текучести материала, охватывают пояси балки, но не распространились на стенки. В таком случае деформированную балку можно счи тать подлежащей ремонту, хотя несущая способность конструкции в целом не была потеряна. Предварительные расчеты показали, что при реальном пределе текучести материала металлической конструкции ( $\sigma_{0,2}^{09G2C} = 325$  МПа), пластические деформации невелики. Для наглядности примем предел текучести материала портала равным  $\sigma_{0,2} = 100$  МПа. Определим величину горизонтальной инерционной силы  $F_{\text{пл}}$ , порож дающей номинальные напряжения в опасном сечении портала, равные пределу текучести:

$$F_{\text{пл}} = \frac{\sigma_{0,2}}{\sqrt{\left(\frac{M_{\text{топ}}^1}{W_{\text{оп}}}\right)^2 + 3\left(\frac{1}{S_{\text{оп}}}\right)^2}} = 232 \text{ кН, (12)}$$

где  $M_{\text{топ}}^1$  – изгибающий момент в опасном сечении от единичной горизонтальной силы;  $W_{\text{оп}}$  – момент сопротивления опасного сечения;  $S_{\text{оп}}$  – суммарная площадь стенок в опасном сечении.

Величина  $c'_x$  характеризует угол наклона кри вой «нагрузка–деформация» на участке, когда нагрузка превышает критическое усилие  $F_{\text{пл}}$ . Данная жесткость учитывает как упрочнение материала, так и нелинейное изменение податливости конструкции вплоть до образования пластического шарнира в опасном сечении. Как отмечено выше, в настоящей работе рассматри вается закритическое поведение портала козлово го крана вплоть до охвата текучестью поясов опасного сечения жесткой ноги. Для определения величины параметра  $c'_x$ , следует вычислить усилие  $F'_{\text{пл}}$ , при котором номинальные напряжения, равные пределу текучести материала, охватывают пояса коробчатого сечения, и соот ветствующее этому усилию перемещение  $\Delta'_{\text{пл}}$ . Такой расчет может быть произведен с помощью МКЭ либо аналитически и не представляется особенно сложным. Искомая величина может быть определена по формуле

$$c'_x = \frac{F'_{\text{пл}} - F_{\text{пл}}}{\Delta'_{\text{пл}} - \Delta_{\text{пл}}},$$

где  $\Delta_{\text{пл}}$  – перемещение, соответствующее на грузке  $F_{\text{пл}}$ .

Вычисленное значение –  $c'_x \approx 0,1c_x$ .

Подставив определенные параметры дина мической модели в систему уравнений (3), решим данную систему при следующих начальных условиях:

$$\begin{aligned} X(0) &= 0; \dot{X}(0) = 0; Y(0) = 0; \dot{Y}(0) = 0; \\ x1(0) &= 0; \dot{x}1(0) = 0; x2(0) = 0; \dot{x}2(0) = 0; \\ y(0) &= 0; \dot{y}(0) = 0; F(0) = F_{\text{пл}}. \end{aligned}$$

Для решения системы уравнений (3) в данной работе используется решатель Radau, осно ванный на одноименном численном алгоритме. Решение производилось с использованием про граммы Mathcad 14.

## Результаты

Результаты расчета сравним с анализом, ис пользовавшим МКЭ с идентичными параметрами расчетной модели. Общий вид конечно-элементной модели (КЭ-модели) представлен на рис. 4. КЭ-модель состоит из двумерных элементов типа Plate с заданными толщинами, соответствую щими проектным, элемента сейсмический массы (подробнее про метод сейсмической мас сы – см. [14], [19]) и абсолютно жестких элемен тов типа Rigid, связывающих опоры портала с массой, а также моделирующих шарнир одной из опор. Материал конечных элементов задан следующими параметрами:

модуль Юнга –  $E = 210$  ГПа;  
модуль сдвига –  $G = 80,7$  ГПа;  
коэффициент Пуассона –  $\nu = 0,3$ ;  
объемная плотность –  $\rho = 7850$  кг/м<sup>3</sup>;

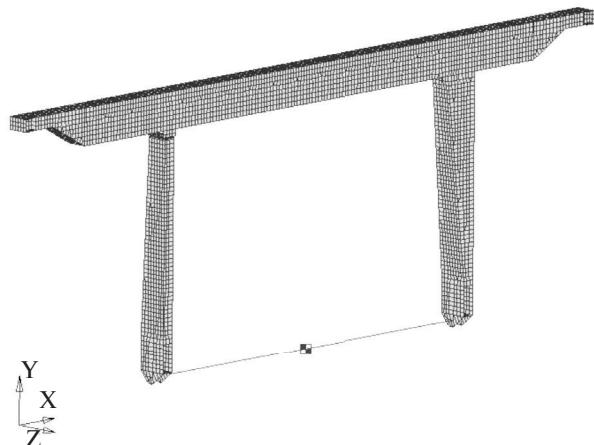


Рис. 4. Общий вид КЭ-модели

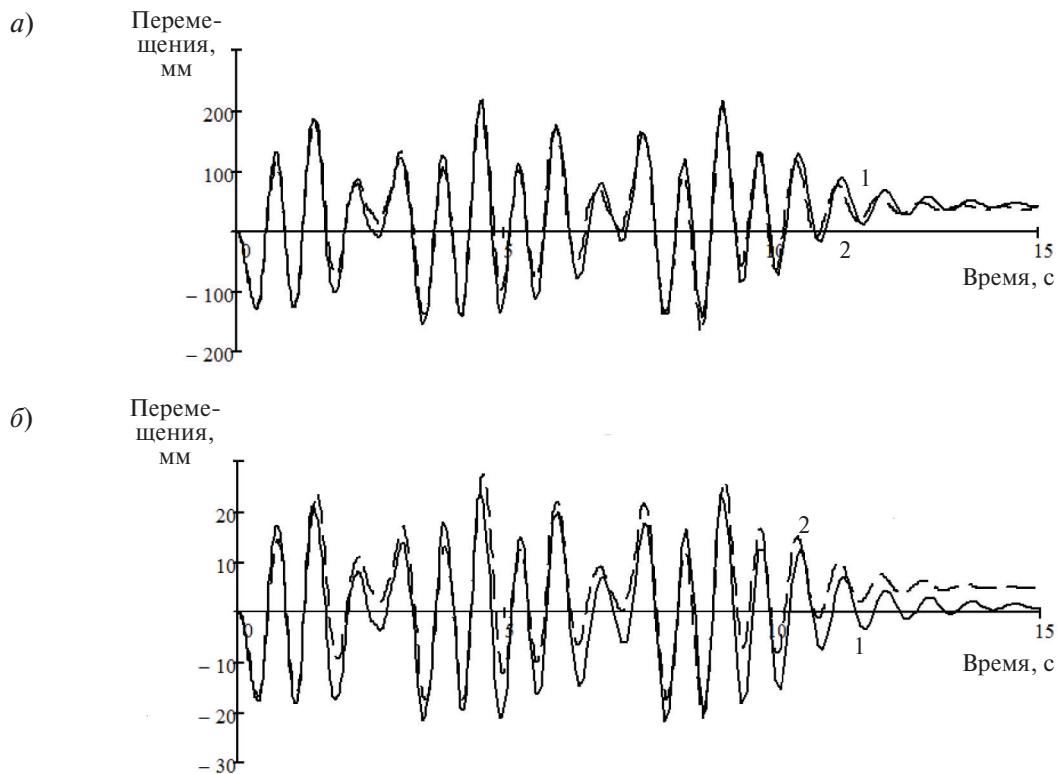


Рис. 5. Графики перемещений точки в центре пролета портала: а) по оси  $X$ ; б) по оси  $Y$  (1 – Nastran, 2 – Аналитика)

критерий текучести – по теории Фон-Мизеса;

предел текучести –  $\sigma_{0,2} = 100$  МПа;

модуль пластичности –  $H = 1005$  МПа;

Входное сейсмическое воздействие задано аналогично (11).

На рис. 5 представлены сравнительные графики перемещений приведенной массы аналитической модели и узла КЭ-модели, находящегося в центре пролетного строения портала.

Перемещения приведенных масс относительно основания:

$$\begin{aligned} x_{\text{пл}}(t) &= (x_2(t) - X(t)) + (y(t) - Y(t)) \cos(\alpha); \\ y_{\text{пл}}(t) &= (x_2(t) - X(t)) \sin(\alpha) + (y(t) - Y(t)). \end{aligned} \quad (13)$$

Расхождение графиков по оси  $Y$  (рис. 5, б) можно объяснить более сложной взаимосвязью перемещений по двум взаимно перпендикулярным координатам, чем это было предположено в формуле (1). Однако характер колебаний при-

веденной массы по вертикальной оси незначительно отличается от экспериментального (полученного по МКЭ), что позволяет говорить о допустимой погрешности вычислений для инженерной методики, предназначеннной для стадии проектирования.

Для оценки пластических деформаций введем понятие пластического регистратора. В данном исследовании этот параметр является некой кумулятивной величиной, показывающей величину пластического перемещения  $x_{\text{пл}}(t) = x_2(t) - x_1(t)$  и отражающей на временной шкале участки пластического деформирования:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{пл}}(t) &= \\ &= \begin{cases} \varepsilon_{\text{пл}}(t - \Delta t) + |x_{\text{пл}}(t)|, & \text{если } |x_{\text{пл}}(t) - x_{\text{пл}}(t - \Delta t)| \geq \delta; \\ \varepsilon_{\text{пл}}(t - \Delta t) & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

Здесь параметры  $\Delta t$  и  $\delta$  зависят от шага интегрирования системы (3) и метода решения. В данном случае  $\Delta t = 0,001$  с, порог чувствительности –  $\delta = 0,01\%$ .

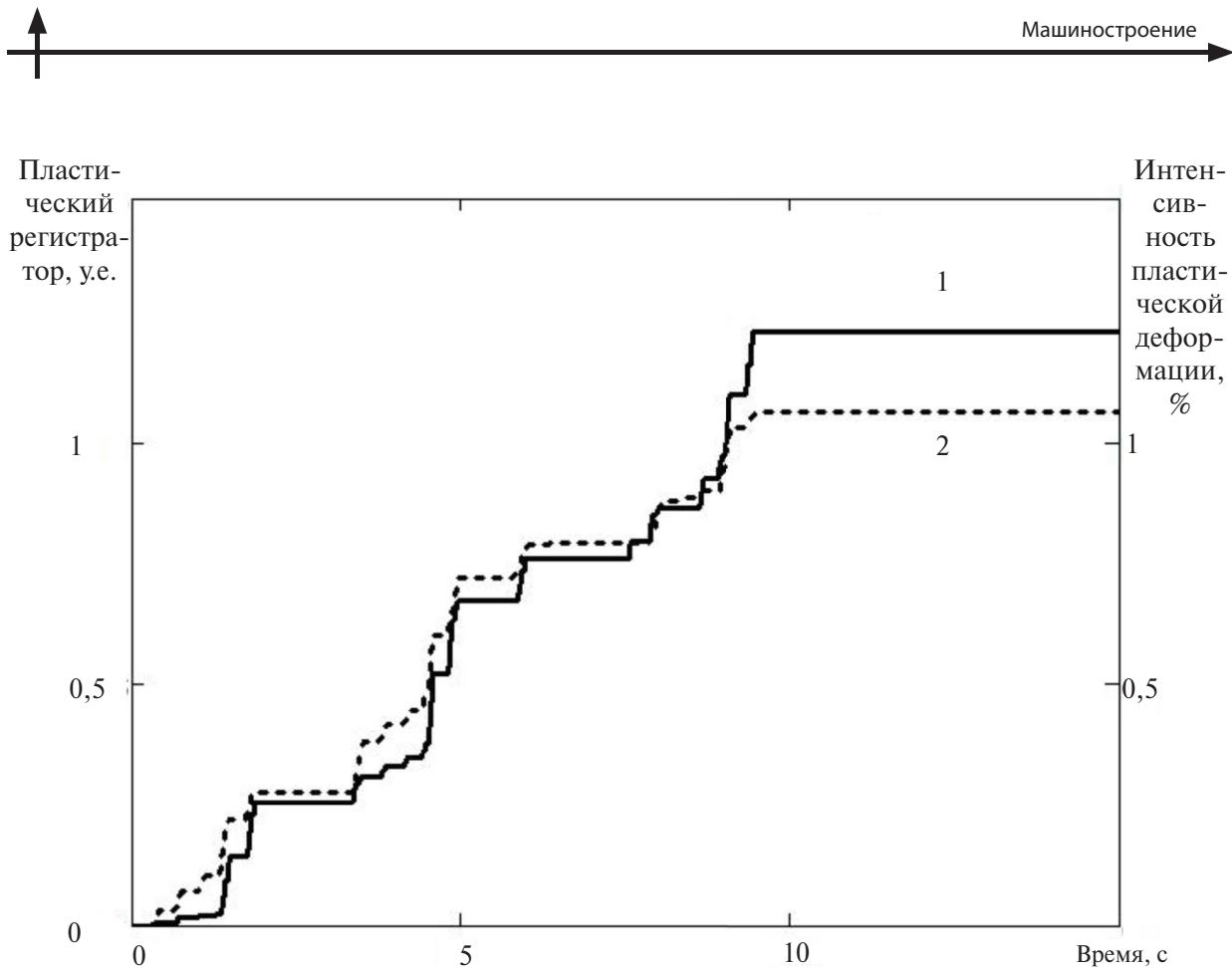


Рис. 6. Сравнение пластических деформаций опасного сечения портала  
 1 – пластический регистратор, у.е.; 2 – интенсивность пластической деформации, %

Для сравнения пластических деформаций используем вектор «7088..Plate Top Plastic Strain» выходных данных решателя NX Nastran SOL129 – Nonlinear Transient Analysis. Сравнительный график указанных величин на временной шкале изображен на рис. 6. По данному графику можно сравнить хронологию пластических деформаций конструкции и их интенсивность. Расхождение оценок интенсивности пластической деформации аналитического решения и решения МКЭ составило 12,8 %.

### Выводы

В статье изложена методика расчета металлической конструкции козлового крана на сейсмостойкость. Приведены упрощенные методы моделирования портала крана. Представлен метод моделирования пластических деформаций опасного сечения конструкции. Предложенная

методика имеет допустимую погрешность при вычислении как линейных, так и нелинейных перемещений. Сравнение результатов расчетов по предлагаемой методике с численным экспериментом показало:

расхождение оценки собственных частот конструкции – 1,63 %;

расхождение оценки пластической деформации конструкции – 12,8 %.

Таким образом, предложенный метод прямого динамического анализа сейсмостойкости портала козлового крана с учетом возможных местных повреждений конструкции может быть применен на стадии проектирования, что позволит избежать дополнительных проектировочных итераций и, как следствие, снизить затраты на производство крана в целом. Областью применения методики являются козловые краны общепромышленного назначения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Soderberg E.** Seismic guidelines for container cranes. TCLEE Conference. Oakland, CA. 2009. P. 1–27.
2. **Soderberg E., Jordan M.** Seismic response of jumbo container cranes and design recommendations to limit damage and prevent collapse // Transactions, SMiRT 19. San Diego, CA. 2007. P. 1–10.
3. **Плотников Д.Г., Соколов С.А., Боровков А.И., Михайлов А.А.** Методика оценки прочности металлических конструкций подъемно-транспортных машин //Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2015. № 1 (214). С. 186–193.
4. **СНиП II-7-81\***. Строительство в сейсмических районах. Москва. 2011.
5. **ГОСТ 30546.1-98.** Общие требования к машинам, приборам и другим техническим изделиям и методы расчета их сложных конструкций в части сейсмостойкости. Минск: Издательство стандартов, 1998.
6. **Бирбраер А.Н.** Расчет конструкций на сейсмостойкость. СПб: Наука, 1998.
7. **Малиновский В.А.** Стальные канаты. Часть I: Некоторые вопросы технологии, расчета и проектирования. Одесса: Асптропринт, 2001. 188 с.
8. **Синельщиков А.В.** Обеспечение сейсмической безопасности грузоподъемных кранов на основе системного подхода // Подъемно-транспортное дело. 2015. № 1. С. 2–6.
9. **Синельщиков А.В.** Основы теории сейсмостойкости подъемных сооружений // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2009. №2, Т. 1 С. 133–141.
10. **Гаврилов П.А.** Учет физической и геометрической нелинейностей при расчете сейсмостойкости крановых металлических конструкций // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2015. №1(214). С. 216–225.
11. **Бирбраер А. Н., Ролендер А.Ю.** Экстремальные воздействия на сооружения. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2009. 594 с.
12. **Соколов С.А.** Металлические конструкции подъемно-транспортных машин. СПб.: Политехника, 2005. 423 с.
13. **Рубан В.Г., Матва А.М.** Решение задач динамики железнодорожных экипажей в пакете Mathcad. Учебное пособие. Ростов-на-Дону: Изд-во Рост. гос. ун-та путей сообщения, 2009. 99 с.
14. **Шимкович Д.Г.** Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows. М: ДМК Пресс, 2001. 448 с.
15. **Гаврилов П.А.** Анализ сейсмостойкости козлового крана // Международный союз ученых «Наука. Технологии. Производство». 2014. № 3 (3). С. 37–40.
16. **Соколов С.А.** Строительная механика и металлические конструкции машин. СПб.: Политехника, 2011.
17. **Дурновцева С.А.** Метод синтеза сейсмических колебаний, соответствующих заданному семейству спектров ответа // Вестник С.-Петербург. ун-та. Сер. 10: Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2013. № 2. С. 112–120.
18. **Zentner I.** A procedure for simulating synthetic accelerograms compatible with correlated and conditional probabilistic response spectra // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2014. Vol. 63. P. 226–233.
19. **Yong-Woo K., Myung J.J.** A study on large mass method on dynamic problem of multiple degree-of-freedom system excited by ground acceleration time history // Journal of Mechanical Science and Technology. 2014. P. 25–41.

## REFERENCES

1. **Soderberg E.** Seismic guidelines for container cranes. TCLEE Conference. Oakland, CA. 2009. P. 1–27.
2. **Soderberg E., Jordan M.** Seismic response of jumbo container cranes and design recommendations to limit damage and prevent collapse. Transactions, SMiRT 19. San Diego, CA. 2007. P. 1–10.
3. **Plotnikov D.G., Sokolov S.A., Borovkov A.I., Mikhaylov A.A.** Metodika otsenki prochnosti metallicheskikh konstruktsiy podyemno-transportnykh mashin [Strength estimation method for metal structures of hoisting equipment]. St. Petersburg State Politecnical University Journal. St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2015. № 1(214). S. 186–193. (rus.)
4. **СНиП II-7-81\***. Stroitelstvo v seismicheskikh rayonakh [Building Codes Of Russia. Seismic building design code]. Moscow, 2011. (rus.)
5. **ГОСТ 30546.1-98.** Obshchiye trebovaniya k mashinam, priboram i drugim tekhnicheskim izdeliyam i metody rascheta ikh slozhnykh konstruktsiy v chasti seysmostoykosti. [State standart specification. General requirements for machines, instruments and the other industrial products and calculation methods for their complex structures as to seismic stability.] Minsk: Izdatelstvo standartov, 1998. (rus.)
6. **Birbrayer A.N.** Raschet konstruktsiy na seysmostoykost. [Seismic analysis of structures] SPb: Nauka, 1998. (rus.)
7. **Malinovskiy V.A.** Stalnyye kanaty. Chast I: Nekotoryye voprosy tekhnologii, rascheta i proyektirovaniya. [Steel wire ropes. Volume 1. Some



- questions of technologu, calculation and design]. Odessa: Asptroprint, 2001. 188 s. (rus.)
8. **Sinelschikov A.V.** Obespecheniye seysmicheskoy bezopasnosti gruzopodyemnykh kranov na osnove sistemnogo podkhoda. [Ensuring seismic safety of cranes through a systematic approach.]. *Podyemno-transportnoye delo*. 2015. № 1. S. 2–6. (rus.)
9. **Sinelschikov A.V.** Osnovy teorii seysmostoykosti podyemnykh sooruzheniy [Bases of the theory of the seismic stability of lift construction]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki*. 2009. №2. T. 1. S. 133–141. (rus.)
10. **Gavrilov P.A.** Uchet fizicheskoy i geometricheskoy nelineynostey pri raschete seysmostoykosti kranovykh metallicheskikh konstruktsiy [Seismic analysis of cranes regarding geomewtric and physical nonlinearities.]. *St. Petersburg State Politecnical University Journal*. St. Petersburg: SPbGPU Publ. 2015. № 1 (214). P. 216–225. (rus.)
11. **Birbrayer A.N., Rolender A.Yu.** Ekstremalnyye vozdeystviya na sooruzheniya. [Extreme actions on structures.] SPb: Izdatelstvo Politekhnicheskogo universiteta, 2009. 594 p. (rus.)
12. **Sokolov S.A.** Metallicheskiye konstruktsii podyemno-transportnykh mashin. [Metal structures of hoisting machines.] St. Petersburg: Politekhnika, 2005. 423 p. (rus.)
13. **Ruban V.G., Matva A.M.** Resheniye zadach dinamiki zheleznodorozhnykh ekipazhey v pakete Mathcad: Uchebnoye posobiye. [Dynamic analysis of railway vehicles using Mathcad. Schoolbook.] Rostov-na-Donu: Izd-vo Rost. gos. un-t putey soobshcheniya., 2009. 99 p. (rus.)
14. **Shimkovich D.G.** Raschet konstruktsiy v MSC/NASTRAN for Windows. [Analysis of structures with MSC/NASTRAN for Windows] Moscow: DMK Press, 2001. 448 p. (rus.)
15. **Gavrilov P.A.** Analiz seysmostoykosti kozlovogo kraana [Seismic analysis of gantry crane.]. *Mezhdunarodnyy soyuz uchenykh "Nauka. Tekhnologii. Proizvodstvo"*. 2014. № 3 (3). P. 37–40. (rus.)
16. **Sokolov S.A.** Stroitelnaya mekhanika i metallicheskkiye konstruktsii mashin. [Building mechanics and metal structures of machines.] St. Petersburg: Politekhnika, 2011. (rus.)
17. **Durnovtseva S.A.** Metod sinteza seysmicheskikh kolebaniy, sootvetstvuyushchikh zadannomu semeystvu spektrov otveta. [A method of synthesis of seismic vibrations, corresponding to response spectrum]. *Vestn. S.-Peterb. un-ta. Ser. 10. Prikladnaya matematika. Informatika. Protsessy upravleniya*. 2013. № 2. S. 112–120. (rus.)
18. **Zentner I.** A procedure for simulating synthetic accelerograms compatible with correlated and conditional probabilistic response spectra. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2014. Vol. 63. P. 226–233.
19. **Yong-Woo K., Myung J.J.** A study on large mass method on dynamic problem of multiple degree-of-freedom system excited by groung acceleration time history. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2014. P. 25–41.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

- ГАВРИЛОВ Петр Александрович** – аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.  
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.  
E-mail: issahel@mail.ru
- GAVRILOV Piotr A.** – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.  
E-mail: issahel@mail.ru