

А. В. Синельщиков, канд. техн. наук; Н. Н. Панасенко, д-р техн. наук, проф.

ФГОУ ВПО «АСТРАХАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Астрахань, Россия

РЕКОНСТРУКЦИЯ БАШЕННЫХ КРАНОВ ОБЩЕПРОМЫШЛЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИХ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ

Предложена методика расчетного обоснования технологии реконструкции и усиления расчетных элементов металлоконструкций башенных кранов общепромышленного несейсмостойкого исполнения на примере КБ-408 для перевода их в сейсмостойкое исполнение для эксплуатации в сейсмических зонах 7, 8, 9 баллов, согласно карт сейсмического районирования территории РФ СНиП II-7-81* «Строительство в сейсмических районах».

Вынужденные сейсмические колебания недемпфированной системы расчетно-динамической модели (РДМ) крана с n степенями свободы имеет вид:

$$[M]\{\dot{V}(t)\} + [K]\{V(t)\} = -[M]\{\ddot{A}(t)\}, \quad (1)$$

где $[M]$ и $[K]$ – матрицы масс и жесткости РДМ конструкции башенного крана.

В матричном уравнении (1) $\{\ddot{A}(t)\}$ – вектор сейсмического воздействия 8 баллов. На рис. 1 показана РДМ башенного крана КБ-408, построенная с использованием (1), производства Нязепетровского краностроительного завода Челябинской области грузоподъемностью $Q_{\text{ном}}=10$ т, а на рис. 2 СВ $\{\ddot{A}(t)\}$ 8 баллов в виде вероятностно-статистической акселерограммы (ВСА). Демпфирование ξ в (1) определяется выражением (2)

$$\xi = \delta_3 \left[(2\pi)^2 + \delta_3^2 \right]^{0,5} \approx \delta_3 / 2\pi, \quad (2)$$

где δ_3 – декремент затухания колебаний.

В качестве расчетного базиса выбраны собственные векторы, полученные для динамической системы крана из уравнений свободных колебаний, полученных из (1).

$$[M]\{\ddot{V}(t)\} + [K]\{V(t)\} = \{0\}. \quad (3)$$

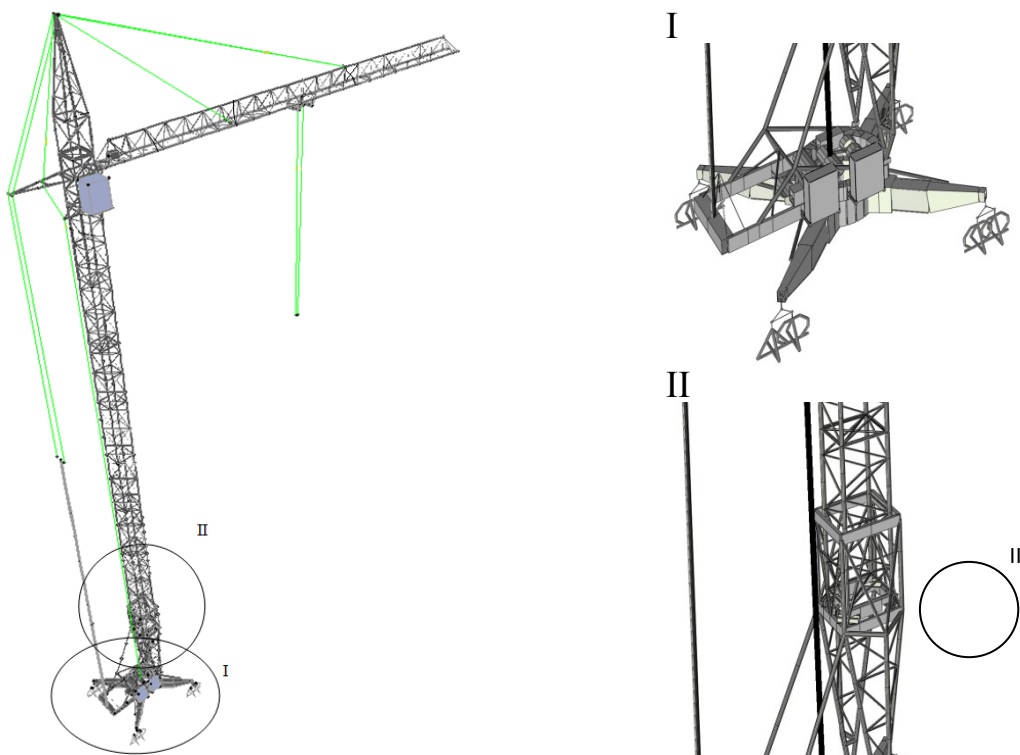


Рис. 1. Расчетно-динамическая дискретно-континуальная конечно-элементная модель крана КБ-408: число степеней свободы $n=4308$, узлов $u=718$, конечных элементов (КЭ) $s=1424$

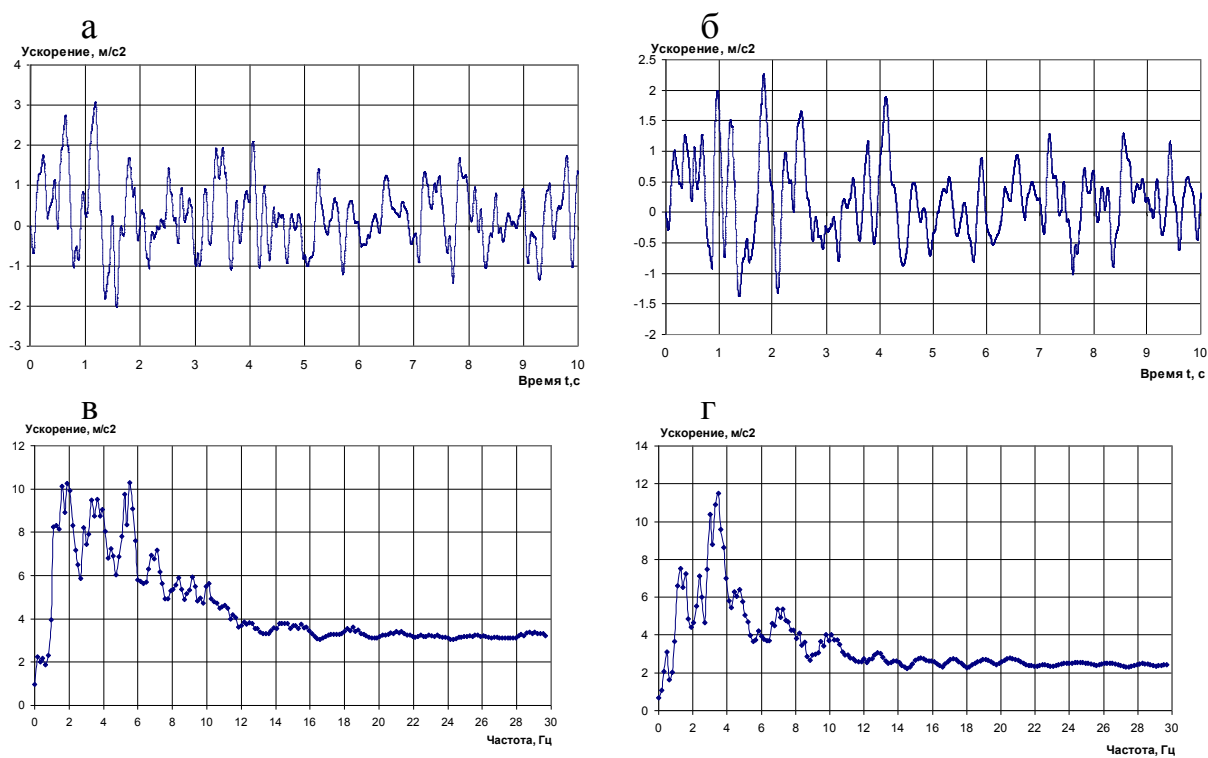


Рис. 2. Вероятностно-статистическая акселерограмма 8 баллов: а – компоненты X, Y; б – Z; в, г – сейсмический спектр ответа ВСА: в – компоненты X, Y; г – Z

Связь между обобщенными координатами $\{V\}$ и нормальными координатами $\{\psi\}$ определяется соотношением:

$$\{V\} = [\Phi]\{\psi\}, \quad (4)$$

где матрица $[\Phi]$ содержит в качестве столбцов собственные векторы (формы колебаний) $\{\phi_m\}$, определяемая из матричного уравнения для собственных значений

$$([K] - [\Lambda][M])[\Phi] = \{0\}. \quad (5)$$

Здесь $[\Lambda]$ – диагональная матрица квадратов собственных частот РДМ крана. Подставляя в (1) выражение (4) и его вторую производную и умножая полученное уравнение на транспонированный вектор m -ой формы колебаний $\{\phi_m\}^T$, получим

$$\{\phi_m\}^T [M][\Phi]\{\ddot{\psi}\} + \{\phi_m\}^T [K][\Phi]\{\psi\} = -\{\phi_m\}^T [M]\{\ddot{A}(t)\}. \quad (6)$$

Уравнение (6), согласно условиям ортогональности, доказанным Рэле-ем, с учетом (5) распадается на несвязанные уравнения

$$M_m \ddot{\psi} + K_m \psi = -\{\phi_m\}^T [M]\{\ddot{A}(t)\}, \quad (7)$$

где M_m и K_m – модальные масса и жесткость соответственно:

$$M_m = \{\phi_m\}^T [M]\{\phi_m\}; \quad K_m = \{\phi_m\}^T [K]\{\phi_m\}. \quad (8)$$

Вектор в правой части (7) с учетом (8) представляет собой долю сейсмической нагрузки на кран, вызывающую колебания его РДМ по m -ой форме. Если СВ в (7) представим в виде:

$$\{\ddot{A}(t)\} = \{\overline{\cos}\}\ddot{A}_0(t), \quad (9)$$

где $\{\overline{\cos}\}$ – трехкомпонентный вектор направляющих косинусов компонент акселерограммы (см. рис. 2 а, б) в общей системе координат (ОСК), то уравнение (7) с учетом затухания (2) примет вид:

$$\ddot{\psi} + 2\xi_m \omega_m \dot{\psi} + \omega_m^2 \psi = -D_m \ddot{A}_0(t), \quad (10)$$

где ω_m – с учетом (4), (6) и (8) – собственная частота колебаний осциллятора: $\omega_m^2 = K_m / M_m$; $D_m = \{\phi_m\}^T [M]\{\overline{\cos}\} / M_m$ – коэффициент влияния, величина постоянная для m -ой формы колебаний РДМ крана.

Из (1) и (7) следует, что сейсмические нагрузки по своей природе являются расчетными инерционными нагрузками, для определения которых необходимо знать абсолютные ускорения колебаний земли. Для многомассовых систем грузоподъемных кранов расчетные сейсмические нагрузки определяются вектором

$$\{S(t)\} = [M]\{\ddot{A}_a(t)\}, \quad (11)$$

в котором $\{\ddot{A}_a(t)\}$ – вектор абсолютных ускорений земли в обобщенных координатах(4). Учитывая (7) и(11), вклад от m -ой формы колебаний конструкции крана в искомую в линейно-спектральном методе теории сейсмостойкости (ЛСМ) расчетную сейсмическую нагрузку имеет вид:

$$\{S(t)\}_m = [M]\{\phi_m\}D_m \ddot{y}_{a,m}(t). \quad (12)$$

Здесь $\ddot{y}_{a,m}(t)$ – абсолютное ускорение m -го осциллятора, испытывающего СВ $\ddot{A}_0(t)$. Принципиально важным моментом в ЛСМ пространственных конструкций подъемных сооружений является переход от динамической задачи (12) к квазистатической, что осуществляется заменой временной функции $\ddot{y}_{a,m}(t)$ в (12) на постоянную величину $\ddot{y}_{a,m}$, которая представляет собой максимальную реакцию осциллятора с частотой ω_m на воздействие, заданное акселерограммой $\ddot{A}_0(t)$ (см.(9)). При этом величину $\ddot{y}_{a,m}(t)$ следует получать из сейсмического спектра ответа (ССО) для заданной акселерограммы (см. рис. 2 в, г), поэтому расчет m -ой сейсмической силы(12), в соответствии с ЛСМ, осуществляется с использованием ССО по формуле

$$\{S\}_m = [M]\{\phi_m\}D_m W(\omega_m, \xi_m), \quad (13)$$

где $W(\omega_m, \xi_m)$ – отсчет ССО с затуханием ξ_m на частоте ω_m , построенного для акселерограммы $\ddot{A}_0(t)$ из(9). При этом $\ddot{y}_{a,m} = W(\omega_m, \xi_m)$. Если исходная акселерограмма (в данном случае – ВСА) задана трехкомпонентным воздействием вида(9), что чаще всего имеет место на практике, сейсмическую нагрузку (13) по m -ой форме колебаний на конструкцию крана вычислим по формуле

$$\{S\}_m = [M]\{\phi_m\} \frac{\{\phi_m\}^T [M]}{\{\phi_m\}^T [M] \{\phi_m\}} \{W(\omega_m, \xi_m)\}, \quad (14)$$

где $\{W(\omega_m, \xi_m)\}$ – вектор порядка n^* , построенный на основе трехкомпонентного ССО (см. рис. 2 в, г) с использованием ВСА(9), при этом $n^* < n$, где n – число степеней свободы РДМ крана (подъемного сооружения), $n^* = 30 \div 50$ Гц, где:

$$\{W(\omega_m, \xi_m)\} = \left\{ \begin{array}{l} \{W_x(\omega_m, \xi_m), W_y(\omega_m, \xi_m), W_z(\omega_m, \xi_m), 0, 0, 0, 0\}_1^T \\ \dots \\ \{W_x(\omega_m, \xi_m), W_y(\omega_m, \xi_m), W_z(\omega_m, \xi_m), 0, 0, 0, 0\}_n^T \end{array} \right\}. \quad (15)$$

Фактически в рамках ЛСМ вводится понятие квазистатических расчетных сейсмических сил $\{S\}_m$ (14), каждая из которых по m -ой форме колебаний РДМ крана характеризуется тем, что при приложении эквивалентного ей вектора статических сил металлоконструкция крана получит сейсмические смещения $\{V\}_m$, определяемые из условия статического равновесия:

$$[K]\{V\}_m = \{S\}_m. \quad (16)$$

В рамках ЛСМ принимаются наихудшие условия нагружения, которые получаются при совпадении направления действия статических эксплуатационных $\{Q\}_s$ и расчетных сейсмических нагрузок $\{Q\}_s$. Поэтому для каждого КЭ jk суммарные внутренние усилия вычисляются по формуле

$$\{Q\} = \{Q\}_s + \text{sign}(\{Q\}_s) \cdot \{Q\}_s, \quad (17)$$

от которых по III теории прочности переходят к напряжениям (рис. 3).

По результатам расчетного сейсмического анализа, проведенного авторами, установлены КЭ РДМ крана КБ-408, напряжения в которых достигают предела текучести стали 09Г2С ГОСТ 19282-73 ($\sigma_v=320$ МПа) – КЭ № 452 $\sigma_{экв}=354.3$ МПа, $n_{сейсм}=0.903 < [n]=1.0$ (рис. 3).

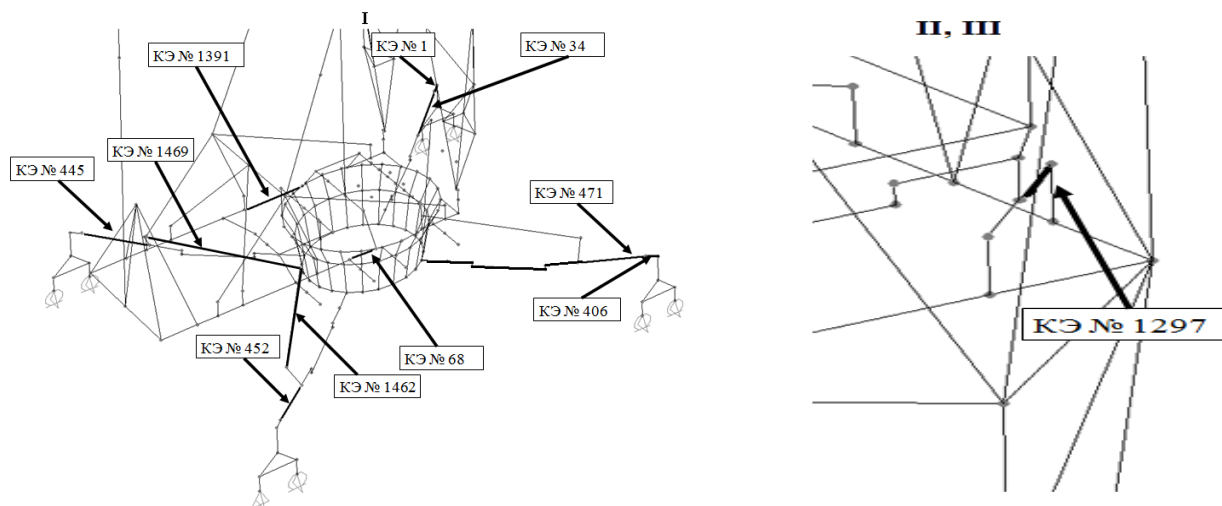


Рис. 3. Расположение наиболее нагруженных элементов металлоконструкции крана КБ-408 при сейсмическом воздействии 8 баллов (см. рис. 1): а – КЭ неповоротной и поворотной рамы; б – то же, корзины башни

Учитывая полученные результаты, для обеспечения сейсмостойкости крана КБ-408, разработана технология усиления его расчетных элементов металлоконструкций. На рис. 4 показан фрагмент его реконструкции на примере флюгера неповоротной рамы крана КБ-408.

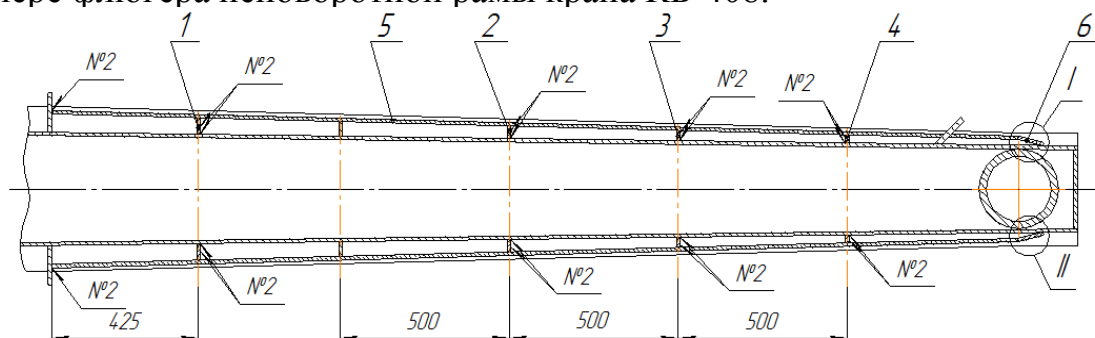


Рис. 4. Усиление металлоконструкции флюгера неповоротной рамы крана КБ-408

В заключение следует указать, что авторы провели повторное расчетное обоснование сейсмостойкости башенного крана КБ-408 на СВ 8 баллов, подвергнутого усилению расчетных элементов металлоконструкций крана, и получили подтверждение его сейсмической безопасности при эксплуатации в зонах 8 баллов.