

Расчет и конструирование машин

УДК 621.87:539.4

Исследование работы кранов мостового типа при сейсмических воздействиях

Д.Н. Спицына, А.В. Шарыгин, И.В. Шарыгин

Приведены результаты теоретического исследования работы кранов мостового типа при сейсмических воздействиях, позволяющие оценить наибольшие напряжения, которые возникают в их металлоконструкциях, и доказать возможность их перемещения вдоль подкрановых путей при заторможенных ходовых колесах.

Ключевые слова: сейсмический, ускорение, краны мостового типа, напряжение, передвижение, рельсовый путь, сухое трение.

The article provides results of the theoretical research of the bridge cranes operation under seismic loads allowing to estimate maximum stresses arising in their metal constructions and to prove a possibility of moving them along the rail tracks with running wheels braked.

Keywords: seismic, acceleration, bridge cranes, stress, movement, rail track, dry friction.

Расчеты кранов, реакторов, строительных конструкций и различного оборудования, работающего в районах, где возможны землетрясения, должны выполняться в соответствии с ГОСТ 30546.1—98 [1].

При расчете кранов мостового типа (мостовых и козловых) на действие сейсмических нагрузок до настоящего времени предполагалось, что они неподвижно связаны с землей. Методы расчета конструкций при таком закреплении разработаны [2, 3]. Однако краны мостового



СПИЦЫНА
Дагмара Николаевна
кандидат технических
наук, доцент



ШАРЫГИН
Андрей Владимирович
студент



ШАРЫГИН
Игорь Владимирович
студент
кафедры
«Прикладная механика»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

типа и при заторможенных ходовых колесах имеют возможность перемещения по рельсовым путям в случае, если действующие вдоль путей динамические нагрузки окажутся больше сил трения ходовых колес по рельсам. В данной статье впервые рассматривается поведение указанных кранов при сейсмическом воздействии с учетом возможности перемещения их вдоль рельсовых путей.

В соответствии с рекомендациями [1] при расчете кранов следует учитывать возможность синусоидальной вибрации земли в течение 1 мин. Значения максимальных ускорений земли зависят от интенсивности землетрясения и уровня установки конструкции над нулевой отметкой. На рисунке 1 приведена зависимость максимальных ускорений от частоты вибрации земли в горизонтальном направлении при условной интенсивности землетрясения 9 баллов по MSK-64 для нулевой отметки при сроке службы конструкции 50 лет [1]. Значения ускорений в вертикальном направлении рекомендуется принимать равными 0,7 от значения ускорений в горизонтальном направлении. Вертикальные и горизонтальные составляющие сейсмических нагрузок рекомендуется учитывать отдельно. При установке конструкции выше нулевой отметки значение максимального ускорения повышается, что учитывается коэффициентом k , определяемым согласно данным табл. 1, в которой представлены выдержки из ГОСТа 30546.1—98.

Таблица 1

Интенсивность землетрясения в баллах	Значение коэффициента k при установке крана над нулевой отметкой	
	От 0 м до 10 м	От 10 м до 35 м
9	1	2
8	0,5	1
7	0,25	0,5

При расчетах стальных сварных конструкций согласно [1] рекомендуется учитывать значения логарифмических декрементов колебаний δ в зависимости от величин расчетных напряжений:

$$\text{при } \sigma_{\max} = 0,67R \quad \delta = 0,12;$$

$$\text{при } \sigma_{\max} > 0,9R \quad \delta = 0,31,$$

где R — расчетное сопротивление материала конструкции.

Указанные логарифмические декременты определяют затухание колебаний за счет внутреннего трения в материале, в соединениях и другое конструкционное демпфирование без учета сухого трения между ходовыми колесами крана и рельсами.

При исследовании колебаний систем с сухим трением задача усложняется тем, что в этих случаях перемещения приведенных масс динамической модели не могут быть описаны одной системой дифференциальных уравнений. Появляются периоды «застоя», т. е. такие отрезки времени, в течение которых силы сухого трения создают между элементами конструкции неподвижные соединения. В эти периоды движение приведенных масс должно описываться другой системой дифференциальных уравнений [4]. В литературе, относящейся к исследованию динамики кранов мостового типа, подобная задача не рассматривалась.

В предлагаемой статье приведены результаты исследования сейсмического воздействия на два крана мостового типа: однобалочный мостовой и козловый с двумя жесткими опорами. При проведении данного исследования краны представлялись в виде упругих систем с приведенными массами. Для упрощения рассматривались только симметричные динамические модели, где предполагалось, что грузовая тележка находится посередине пролета.

Согласно [1] принималось, что земля (и вместе с ней рельсовые пути) начинали двигаться с ускорением $a \sin(\omega t)$. Амплитуда ускорения a согласно рис. 1 зависела от частоты синусоидальной вибрации. Для оценки величины наибольшего сейсмического воздействия в данном исследовании принималось, что частота вибрации земли совпадает с низшей частотой собственных колебаний крана. Так как график, представленный на рис. 1, соответствовал интенсивности землетрясения в 9 баллов при установке крана на нулевой отметке, то для анализа воздействия землетрясений с другой интенсивностью, а также для учета уровня расположения крана над нулевой отметкой,

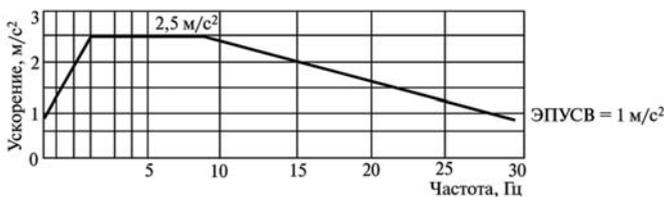


Рис. 1. Зависимость максимальных ускорений земли от частоты ее вибраций в горизонтальном направлении

расчеты проводились при различных значениях амплитуд синусоидальных ускорений a .

Для исследования поведения мостового крана использовалась динамическая модель, показанная на рис. 2.

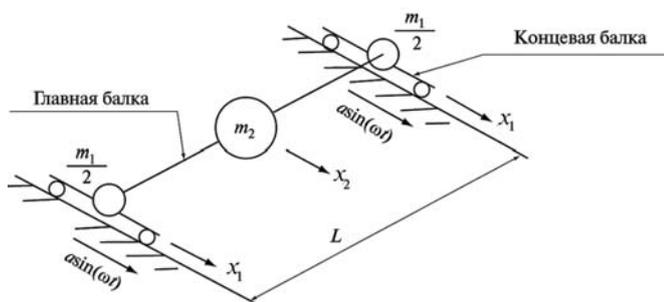


Рис. 2. Динамическая модель мостового крана:

- $m_1 / 2$ — приведенные массы концевых балок и примыкающих к ним участков главной балки;
- m_2 — приведенная масса средней части пролетного строения и масса грузовой тележки с грузом;
- x_1 и x_2 — перемещения соответствующих приведенных масс

Исходные данные для расчета: максимальная грузоподъемность крана $Q = 5000$ кг; пролет крана $L = 9,5$ м; масса главной балки моста $1\ 050$ кг; масса двух концевых балок 200 кг; масса грузовой тележки 800 кг. Масса груза принималась равной $0,3Q$. Приведенные массы m_1 и m_2 имели следующие значения: $m_1 = 725$ кг; $m_2 = 2\ 825$ кг.

Сила сухого трения ходовых колес крана по рельсам:

$$F_{\tau} = (m_1 + m_2)gf = 6,96 \cdot 10^3 \text{ Н},$$

где $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ — ускорение силы тяжести; $f = 0,2$ — коэффициент трения.

Жесткость моста в горизонтальном направлении рассчитывалась согласно [5] по формуле

$$c = 48EI_y / L^3 = 745 \cdot 10^3 \text{ Н/м}.$$

Здесь $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па — модуль упругости стали; $I_y = 6\ 655 \text{ см}^4$ — момент инерции поперечного сечения главной балки относительно вертикальной оси.

В те периоды времени, когда масса m_1 не перемещалась относительно земли, частота колебаний массы m_2 составляла

$$p_1 = \sqrt{c / m_2} = 16,24 \text{ рад/с}.$$

Если масса m_1 начинала двигаться относительно земли, то взаимным перемещениям масс m_1 и m_2 соответствовала частота

$$p_2 = \sqrt{c(m_1 + m_2) / (m_1 m_2)} = 35,9 \text{ рад/с}.$$

Процесс колебаний приведенных масс представлялся в виде ряда последовательно меняющихся этапов. На первом этапе начиналось движение земли с ускорением $a \sin(\omega t)$. Это ускорение сообщалось массам m_1 и m_2 . Пока сила трения была больше динамических нагрузок, действующих на массу m_1 , она не перемещалась относительно земли, а масса m_2 начинала колебаться относительно массы m_1 . Перемещение массы m_2 на этом этапе обозначено x_{21} . Здесь и далее второй индекс у перемещений означает номер этапа.

Дифференциальное уравнение движения массы m_2 :

$$m_2 \ddot{x}_{21} + \alpha \dot{x}_{21} + cx_{21} = m_2 a \sin(\omega t), \quad (1)$$

где $\alpha = \delta / \pi \sqrt{cm_2} = 1,75 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{м}$ — коэффициент демпфирования, соответствовавший логарифмическому декременту колебаний $\delta = 0,12$ [1].

Уравнение (1) интегрировалось при следующих начальных условиях:

$$t = 0, x_{21} = 0; \dot{x}_{21} = v_{21} = 0.$$

Проинтегрировав уравнение (1), определяли функции перемещений x_{21} и скоростей \dot{x}_{21} для каждого текущего значения времени t , по которым из уравнения (1) находили ускорения массы m_2 на первом этапе:

$$\ddot{x}_{12} = -\frac{\alpha}{m_2} \dot{x}_{21} - \frac{c}{m_2} x_{21} + a \sin(\omega t).$$

Интегрирование уравнения (1) производилось до момента времени $t = t_1$, при котором суммарная сила, действовавшая на колеса крана, становилась больше силы трения F_T . Для момента времени t_1 , которое определялось из условия

$$|m_1 a \sin(\omega t_1) + c x_{21}(t_1)| = |F_T|$$

находили значения $x_{21}(t_1)$, $v_{21}(t_1)$ и $u_{21}(t_1)$.

На втором этапе обе массы (m_1 и m_2) перемещались относительно земли на расстояния x_{12} и x_{22} соответственно.

Дифференциальные уравнения движения масс m_1 и m_2 на этом этапе:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_{12} + \alpha(\dot{x}_{12} - \dot{x}_{22}) + c(x_{12} - x_{22}) &= \\ &= F_T \operatorname{sign}(\dot{x}_{12}) + m_1 a \sin(\omega t + \varphi_1); \\ m_2 \ddot{x}_{22} + \alpha(\dot{x}_{22} - \dot{x}_{12}) + c(x_{22} - x_{12}) &= \\ &= m_2 a \sin(\omega t + \varphi_1), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\varphi_1 = \omega t_1$ — сдвиг фазы синусоидального воздействия.

При интегрировании системы уравнений (2) использовались следующие начальные условия: $t = 0$; $x_{12} = 0$; $x_{22} = x_{21}(t_1) = 6,536 \cdot 10^{-3}$; $\dot{x}_{12} = 0$; $\dot{x}_{22} = v_{21}(t_1) = 0,148$.

Проинтегрировав систему уравнений (2), получали значения функций x_{12} , $\dot{x}_{12} = v_{12}$, x_{22} , $\dot{x}_{22} = v_{22}$ в последовательные моменты времени второго этапа.

С помощью полученных значений этих функций для каждого момента времени t из системы уравнений (2) определяли ускорения u_{12} и u_{22} масс m_1 и m_2 :

$$\begin{aligned} \ddot{x}_{12} &= -\frac{\alpha}{m_1} [v_{12} - v_{22}] - \frac{c}{m_1} x_{12} + \\ &+ \frac{c}{m_1} x_{22} + \frac{F_T}{m_1} + a \sin(\omega t + \alpha_1); \\ \ddot{x}_{22} &= -\frac{\alpha}{m_2} [v_{22} - v_{12}] - \frac{c}{m_2} x_{22} + \\ &+ \frac{c}{m_2} x_{12} + a \sin(\omega t + \alpha_1). \end{aligned}$$

Второй этап заканчивался в момент времени $t = t_2$, устанавливаемый из условия

$$|F_T| = |m_1 a \sin(\omega t_2 + \alpha_1) - c [x_{12}(t_2) - x_{22}(t_2)]|.$$

При этом определяли значения перемещений и скоростей обеих масс в конце второго этапа: $x_{12}(t_2)$, $x_{22}(t_2)$, $v_{12}(t_2)$, $v_{22}(t_2)$.

На третьем этапе масса m_1 опять не перемещалась относительно земли $x_{13}(t) = 0$, а перемещение $x_{23}(t)$ определялось по уравнению, подобному тому, что было на первом этапе:

$$m_2 \ddot{x}_{23} + \alpha \dot{x}_{23} + c x_{23} = m_2 a \sin(\omega t + \varphi_2),$$

где $\varphi_2 = \omega t_2$.

Начальные условия для интегрирования этого уравнения принимали равными перемещению и скорости массы m_2 в конце второго этапа.

Итак, процесс колебаний мостового крана рассматривался в виде последовательного чередования двух подобных этапов. На одних этапах масса m_1 не перемещалась относительно земли (зона «застоя»), на других происходило перемещение обеих масс. Интегрированием дифференциальных уравнений движения на каждом i -м этапе определялись значения перемещений x_{1i} , x_{2i} и скоростей, обозначенные далее v_{1i} и v_{2i} . По этим значениям, как было показано выше, для каждого момента времени вычислялись ускорения \ddot{x}_{1i} и \ddot{x}_{2i} , максимальные прогибы главной балки в середине пролета $f_i = x_{2i} - x_{1i}$ и силы, действовавшие на массу m_2 , обозначенные $F_i = (x_{2i} - x_{1i})c$. Изгибающие моменты в сечении посередине пролета $M = F_i L / 4$ позволяли найти изменение во времени наибольших напряжений, возникающих в главной балке моста.

Расчеты проводились для четырех вариантов значений максимальных ускорений земли: $a = 0,1g$; $a = 0,2g$; $a = 0,3g$; $a = 0,4g$, где $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ — ускорение силы тяжести. На рисунке 3 приведен график изменения во времени перемещения крана относительно земли x_1 , полученный для случая изменения ускорения земли по закону $0,3g \sin(16,2t)$.

Расчеты показали, что перемещения $x_1(t)$ возникают при всех указанных выше значениях максимальных ускорений a . Они начинаются с момента времени $t = 0,5 \dots 1,0$ с и могут происходить как в одну, так и в другую сторону. При больших значениях a скорость перемеще-

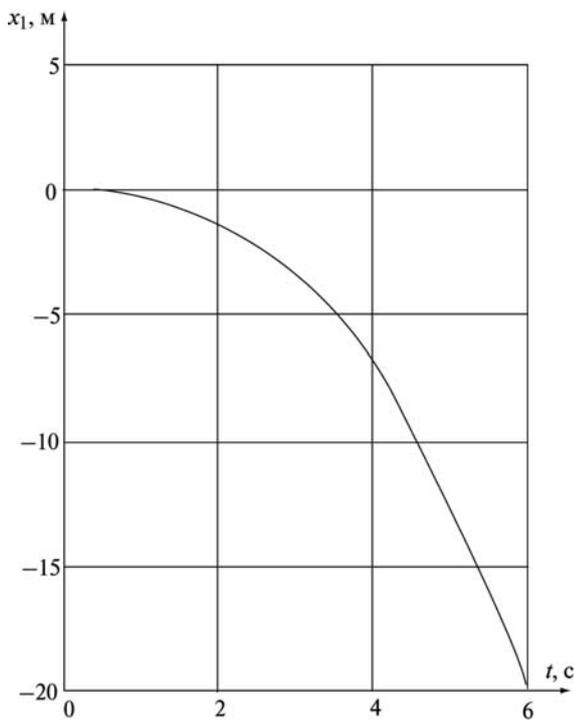


Рис. 3. Перемещение мостового крана во времени

ний крана нарастает быстрее. В работе [3] упоминается, что при условии, когда $a > fg$ возможно скольжение крана по рельсам. Расчеты показали, что перемещения крана происходят и при $a < fg$ (т. е. при $a = 0,lg$).

На рисунке 4 изображено изменение во времени максимальных прогибов главной балки в середине пролета, возникающих при указанном выше ускорении земли. Подобные графики были получены и для других значений максимальных ускорений земли a . На этих графиках видно, что в начале сейсмического воздействия возникают изгибные колебания главной балки моста, которые длятся 6..8 с. При этом максимальные прогибы главных балок $\sim 8..9$ см и максимальные напряжения $\sim 350..380$ МПа почти не зависят от величины максимального ускорения земли a . По истечении указанного времени колебания крана затухают и кран продолжает движение с небольшим прогибом (~ 1 см) и максимальными напряжениями $\sigma_{\max} \approx 30$ МПа.

Максимальные прогибы и напряжения в балках крановых мостов, возникающие при резонансе (так как при проведении исследования принималось, что $\omega = p_1$) существенно за-

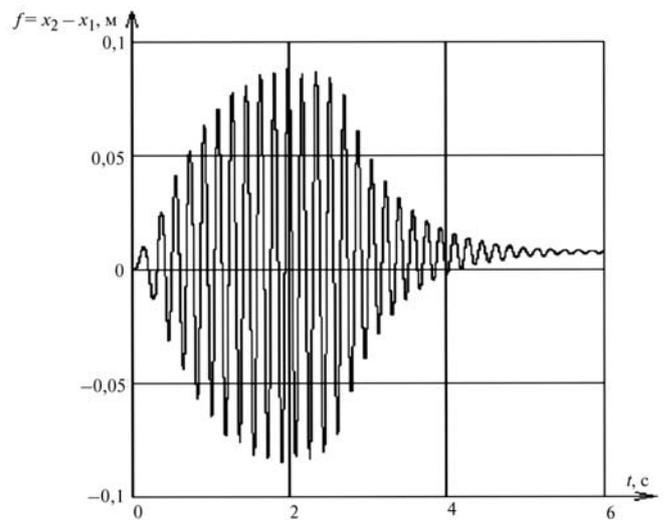


Рис. 4. Изменение во времени максимальных прогибов главной балки мостового крана

висят от величины логарифмического декремента затуханий δ . При отсутствии сейсмического воздействия расчетные напряжения в крановых металлоконструкциях составляют $\sim 0,67R$ (где R — расчетное сопротивление материала). В этом случае согласно [1] рекомендуется принимать $\delta = 0,12$, что и было принято при проведении расчетов.

Однако при резонансе в наиболее нагруженной области балки моста (составляющей несколько процентов от всего материала) напряжения оказались больше предела текучести. При расчетных напряжениях $> 0,9R$ в ГОСТ [1] рекомендуется принимать $\delta = 0,31$.

Из литературных источников известно, что величина логарифмического декремента колебаний затуханий определяется не только внутренним трением в материале, но и конструкционным демпфированием, которое не зависит от уровня напряжений, возникающих при колебаниях [6]. В связи с изложенным выше учесть изменение логарифмического декремента колебаний расчетным путем не представляется возможным, но можно считать, что в действительности максимальные напряжения и прогибы в балках при резонансе будут несколько меньше.

Чтобы объяснить почему перемещение крана x_1 при различных значениях a происходит либо в одну, либо в другую сторону, на рис. 5, а приведены графики трех сил, действующих на мас-

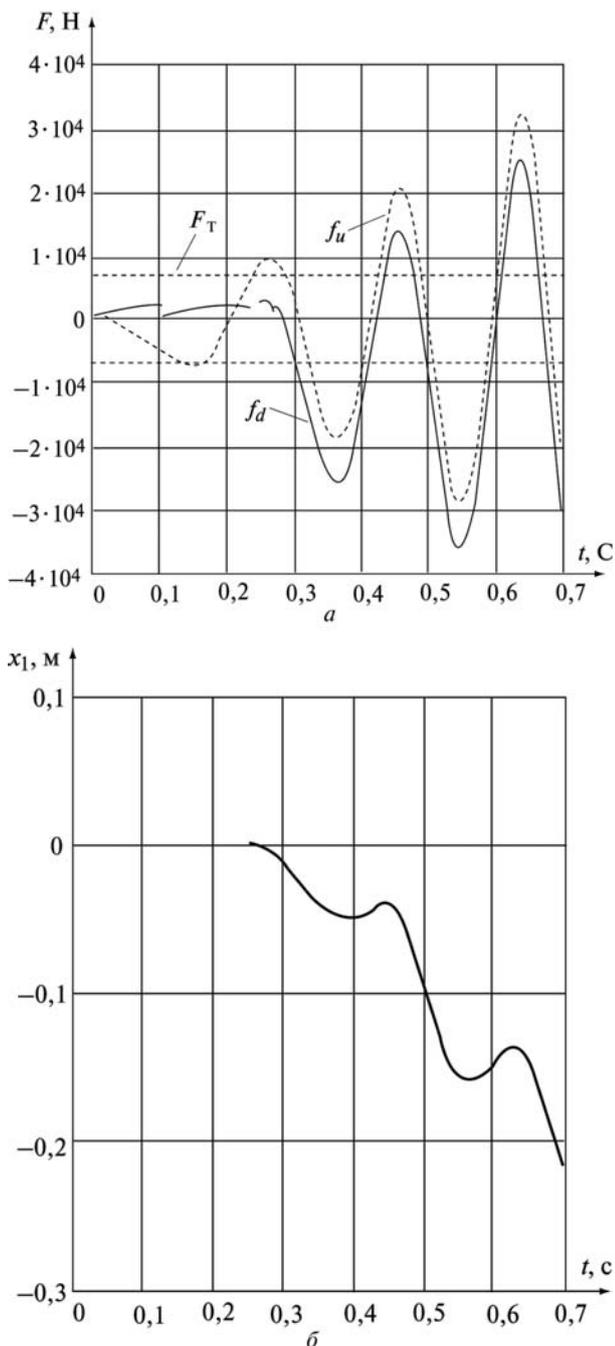


Рис. 5. Силы, действующие на массу m_1 (а), и перемещение массы m_1 (б) в начале сейсмического воздействия:

— — f_d ; - - - - f_u

су m_1 в начале сейсмического воздействия: динамической силы $f_d = m_1 a \sin \omega t - m_1 \ddot{x}_1$, определяющей ускорениями массы m_1 , которая при положительном значении направлена в положительном направлении перемещения x_1 ; силы упругости $f_u = c(x_1 - x_2) = -(m_2 a \sin \omega t - m_2 \ddot{x}_2)$, которая на рис. 5, а изображена с отрицательным

знаком (т. е. при положительном значении сила f_u на рис. 5, а должна быть также направлена в положительном направлении перемещения x_1); силы трения, значения которой $\pm F_T$ изменяются по знаку, но не зависят от времени.

На рисунке 5, а показано, что в интервале времени $t = 0,3 \dots 0,4$ с и $t = 0,5 \dots 0,6$ с динамическая сила f_d и сила упругости f_u по модулю больше силы трения $|F_T|$. На рисунке 5, б видно, что масса m_1 при этом начинает движение в сторону действия этих сил, т. е. в отрицательном направлении. На отрезках времени $t = 0,4 \dots 0,5$ с и $t = 0,6 \dots 0,65$ с силы f_u и f_d изменяют свой знак. При этом x_1 получают отклонения в противоположном направлении. Так как силы f_d и f_u при разных значениях максимального ускорения a изменяются по различным законам, то направление перемещения крана (x_1) в ту или иную сторону носит случайный характер. Так, например, при $a = 0,2g$ этот кран начинает перемещаться в положительном направлении, а при $a = 0,1g$, $a = 0,3g$ и $a = 0,4g$ — в отрицательном.

Как указывалось выше, в данной работе также рассматривалось влияние сейсмического воздействия на козловый кран с двумя жесткими опорами. Предполагалось, что грузовая тележка находилась посередине пролета. Это позволяло упростить динамическую модель крана (рис. 6), так как симметрично расположенные приведенные массы в этом случае имели одинаковые перемещения. Так, массы $m_1 / 2$, приведенные к концам консолей, имели перемещения u_1 , массы $m_2 / 2$, приведенные к верхним концам опор, перемещались на u_2 , масса m_3 , состоявшая из приведенной массы средней части

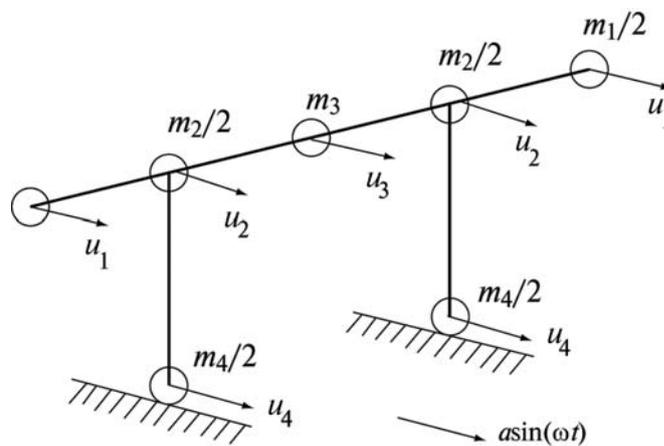


Рис. 6. Динамическая модель козлового крана

пролетного строения и массы грузовой тележки с грузом, перемещалась на u_3 , а массы $m_4 / 2$, включавшие приведенные массы нижних частей опор, массы стяжек, ходовых тележек и электрооборудования, перемещались на u_4 .

Расчеты показывают, что в подобных кранах податливости опор в направлении крановых путей в сотни раз меньше, чем податливости главной балки пролетного строения. В связи с этим далее принималось, что $u_2 = u_4$. Перемещения u_1 и u_3 представлялись в виде сумм: $u_1 = u_4 + x_1$; $u_3 = u_4 + x_3$. Для определения низших частот собственных колебаний крана предполагалось, что кран не перемещается относительно земли, т. е. $u_2 = u_4 = 0$. Уравнения свободных колебаний в этом случае [6] имеют вид

$$\begin{aligned} x_1 &= \delta_{11}(-m_1 \ddot{x}_1) + \delta_{13}(-m_3 \ddot{x}_3); \\ x_3 &= \delta_{31}(-m_1 \ddot{x}_1) + \delta_{33}(-m_3 \ddot{x}_3), \end{aligned}$$

где δ_{11} , δ_{13} , δ_{31} , δ_{33} — податливости балки пролетного строения, определяющиеся обычными методами сопротивления материалов [5].

При этом частоты колебаний

$$\begin{aligned} p_{1,2}^2 &= (m_1 \delta_{11} + m_3 \delta_{33} \pm \\ &\pm \sqrt{(m_1 \delta_{11} - m_3 \delta_{33})^2 + 4m_1 m_3 \delta_{13}^2}) / \\ &/ (2m_1 m_3 (\delta_{11} \delta_{33} - \delta_{13}^2)). \end{aligned} \quad (4)$$

Процесс колебаний козлового крана при сейсмическом воздействии вдоль подкрановых путей можно представить, как и у мостового, в виде последовательности поочередно сменяющихся этапов.

На первом этапе перемещения u_4 масс $m_4 / 2$ относительно земли равны нулю. При землетрясении появляется ускорение земли $a \sin(\omega t)$, с которым начинают двигаться все массы. Массы m_1 и m_3 , не связанные с землей, начинали перемещаться относительно нее на величины x_{11} и x_{31} соответственно (здесь и далее первые индексы определяют направление движения, а вторые — номера этапа). Уравнения движения на этом этапе имеют вид

$$\begin{aligned} x_{11} &= \delta_{11}[-m_1 \ddot{x}_{11} - \alpha_1 \dot{x}_{11} + m_1 a \sin(\omega t)] + \\ &+ \delta_{13}[-m_3 \ddot{x}_{31} + m_3 a \sin(\omega t)]; \\ x_{31} &= \delta_{31}[-m_1 \ddot{x}_{11} + m_1 a \sin(\omega t)] + \\ &+ \delta_{33}[-m_3 \ddot{x}_{31} - \alpha_3 \dot{x}_{31} + m_3 a \sin(\omega t)], \end{aligned} \quad (5)$$

где $\alpha_1 = \frac{\delta}{\pi} \sqrt{m_1 / \delta_{11}}$ и $\alpha_3 = \frac{\delta}{\pi} \sqrt{m_3 / \delta_{33}}$ — коэффициенты демпфирования колебаний консо-

лей и пролетной части моста, определяемые по логарифмическому декременту δ .

Система уравнений (5) интегрировалась при следующих начальных условиях:

$$t = 0; x_1 = 0; x_3 = 0; \dot{x}_1 = 0; \dot{x}_3 = 0.$$

Первый этап колебаний заканчивается, когда суммарная динамическая нагрузка, действующая на кран, становится больше сил трения между заторможенными ходовыми колесами и рельсами. Обозначив общую силу трения F_T , получим условие окончания первого этапа:

$$|F_T| = |Ma \sin(\omega t_1) - m_1 \ddot{x}_{11}(t_1) - m_3 \ddot{x}_{31}(t_1)|,$$

где $F_T = (m_1 + m_2 + m_3 + m_4)gf = Mgf$; $M = m_1 + m_2 + m_3 + m_4$ — общая масса крана; t_1 — время окончания первого этапа.

На втором этапе появляются перемещения u_{42} масс $m_4 / 2$. При этом перемещения остальных масс становятся равными: $u_{12} = u_{42} + x_{12}$; $u_{22} = u_{42}$; $u_{32} = u_{42} + x_{32}$.

Движение на этом этапе описывается системой уравнений:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{u}_{12} + (m_2 + m_4) \ddot{u}_{42} + m_3 \ddot{u}_{32} &= \\ = Ma \sin(\omega t + \varphi_1) + F_T; \\ x_{12} &= \delta_{11}[-m_1 \ddot{u}_{12} - \alpha_1 \dot{x}_{12} + m_1 a \sin(\omega t + \varphi_1)] + \\ &+ \delta_{13}(-m_3 \ddot{u}_{32} + m_3 a \sin(\omega t + \varphi_1)); \\ x_{32} &= \delta_{31}[-m_1 \ddot{u}_{12} + m_1 a \sin(\omega t + \varphi_1)] + \\ &+ \delta_{33}(-m_3 \ddot{u}_{32} - \alpha_3 \dot{x}_{32} + m_3 a \sin(\omega t + \varphi_1)), \end{aligned} \quad (6)$$

где $\varphi_1 = \omega t_1$ — сдвиг фазы синусоидального воздействия на втором этапе.

Для интегрирования системы уравнений (6) принимались следующие начальные условия:

$$\begin{aligned} t = 0; x_{12}(0) &= x_{11}(t_1); x_{32}(0) = x_{31}(t_1); \\ \dot{x}_{12}(0) &= \dot{x}_{11}(t_1); \dot{x}_{32}(0) = \dot{x}_{31}(t_1); \\ u_{42}(0) &= 0; \dot{u}_{42}(0) = 0. \end{aligned}$$

Второй этап заканчивается при $t = t_2$, когда скорость масс $m_4 / 2$ становится равной нулю, а сила трения $|F_T|$ по модулю оказывается равной сумме всех динамических нагрузок, действующих на кран, т. е. при

$$\begin{aligned} |F_T| &= |Ma \sin(\omega t_2 + \varphi_1) - m_1 \ddot{u}_{12}(t_2) - \\ &- m_2 \ddot{u}_{42}(t_2) - m_3 \ddot{u}_{32}(t_2) - m_4 \ddot{u}_{42}(t_2)|. \end{aligned}$$

Следующий, третий этап движения, аналогичен первому. Перемещение $u_{43} = 0$, а массы m_1 и m_3 имели значения x_{13} и x_{33} , определявшиеся из системы уравнений:

$$\begin{aligned} x_{13} &= \delta_{11}[-m_1 \ddot{x}_{13} - \alpha_1 \dot{x}_{13} + m_1 a \sin(\omega t + \varphi_2)] + \\ &+ \delta_{13}[-m_3 \ddot{x}_{33} + m_3 a \sin(\omega t + \varphi_2)]; \\ x_{33} &= \delta_{31}[-m_1 \ddot{x}_{13} + m_1 a \sin(\omega t + \varphi_2)] + \\ &+ \delta_{33}[-m_3 \ddot{x}_{33} - \alpha_3 \dot{x}_{33} + m_3 a \sin(\omega t + \varphi_2)], \end{aligned} \quad (7)$$

где $\varphi_2 = \omega t_2$ — сдвиг фазы синусоидального воздействия на третьем этапе.

Начальные условия при интегрировании системы уравнений (7):

$$\begin{aligned} t = 0; x_{13}(0) = x_{12}(t_2); x_{33}(0) = x_{32}(t_2); \\ \dot{x}_{13}(0) = \dot{x}_{12}(t_2); \dot{x}_{33}(0) = \dot{x}_{32}(t_2). \end{aligned}$$

Подобное чередование этапов происходило до того момента времени, пока не затухали колебания масс m_1 и m_3 .

Для оценки наибольших напряжений, возникающих в сечениях моста козлового крана, необходимо найти силы инерции приведенных масс $(m_1 / 2)\ddot{x}_{1i}$, $m_3\ddot{x}_{3i}$. В периоды времени, когда $u_{4i} = 0$, ускорения $\ddot{x}_{1i}(t)$ и $\ddot{x}_{3i}(t)$ на каждом этапе определяли из систем уравнений, подобных системе (5). При $u_{4i} \neq 0$ из систем уравнений, аналогичных системе (6), находили ускорения $\ddot{u}_{1i}(t)$, $\ddot{u}_{3i}(t)$ и $\ddot{u}_{4i}(t)$. Ускорения $\ddot{x}_{1i}(t)$ и $\ddot{x}_{3i}(t)$ определяли в виде разностей $\ddot{x}_{1i}(t) = \ddot{u}_{1i}(t) - \ddot{u}_{4i}(t)$; $\ddot{x}_{3i}(t) = \ddot{u}_{3i}(t) - \ddot{u}_{4i}(t)$. Максимальные напряжения в сечении пролетного строения над опорой

$$\sigma_{\max} = F_{1i} l / W_y,$$

где $F_{1i} = m_1 / 2[a \sin(\omega t) - \ddot{x}_{1i}(t)] - \alpha_1 \dot{x}_{1i}(t)$ — сила, приложенная на конце консоли; l — длина консоли; W_y — момент сопротивления изгибу пролетной балки относительно вертикальной оси.

В сечении посередине пролетного строения изгибающий момент

$$M = F_{1i} l - F_{3i} L / 4,$$

где $F_{3i} = m_3[a \sin(\omega t) - \ddot{x}_{3i}(t)] - \alpha_3 \dot{x}_{3i}(t)$ — сила, действующая на массу m_3 , а наибольшее напряжение $\sigma_{\max} = M / W_y$.

Численные исследования проводились на примере козлового крана грузоподъемностью $Q = 5$ т, при следующих исходных данных: расстояние между опорами (пролет крана)

$L = 16$ м; длина одной консоли $L = 4,5$ м; масса моста 7 000 кг; масса одной опоры 1 600 кг; масса стяжки 200 кг; масса ходовой тележки 1 400 кг; масса электрооборудования 500 кг; масса грузовой тележки 750 кг; масса груза $0,3 \cdot Q = 1 500$ кг; момент инерции поперечного сечения балки пролетного строения $I_y = 28 \cdot 10^7$ мм⁴; момент сопротивления изгибу $W_y = 126 \cdot 10^4$ мм³.

Приведенные массы для динамической модели, изображенной на рис. 6, соответственно равны $m_1 = 1 260$ кг; $m_2 = 6 200$ кг; $m_3 = 4 690$ кг; $m_4 = 3 900$ кг;

$$M = m_1 + m_2 + m_3 + m_4 = 16 050 \text{ кг.}$$

Податливость одной опоры в направлении рельсовых путей $\delta_{оп} = 2,46 \cdot 10^{-6}$ мм/Н.

Податливости пролетного строения:

$$\begin{aligned} \delta_{11} &= 688 \cdot 10^{-5} \text{ мм/Н}; \\ \delta_{13} = \delta_{31} &= -257,5 \cdot 10^{-5} \text{ мм/Н}; \\ \delta_{33} &= 152,6 \cdot 10^{-5} \text{ мм/Н}. \end{aligned}$$

Частоты собственных колебаний, вычисленные по формуле (4):

$$p_1 = 8,39 \text{ рад/с}; p_2 = 24,9 \text{ рад/с.}$$

Сила трения при затормаживании всех ходовых колес

$$F_T = Mgf = 16 050 \cdot 9,8 \cdot 0,2 = 31 458 \text{ Н.}$$

Коэффициенты демпфирования:

$$\alpha_1 = \frac{\delta}{\pi} \sqrt{m_1 / \delta_{11}} = 517; \alpha_3 = \frac{\delta}{\pi} \sqrt{m_3 / \delta_{33}} = 2 120.$$

В результате интегрирования систем уравнений, подобных (5) и (6), на 13 этапах получены зависимости перемещений u_4 , x_1 и x_3 от времени, которые возникали при изменении ускорений земли по закону $a \cdot \sin \omega t$. Частота колебаний земли при землетрясении ω была принята равной низшей частоте колебаний крана $p_1 = 8,39$ рад/с. Перемещения крана $u_4(t)$ при максимальных ускорениях земли $a = 0,2g$ изображены на рис. 7.

Расчеты показали, что время t_0 начала перемещения крана относительно земли зависит от величины ее максимального ускорения: при $a = 0,2g$ (m/c^2) время $t_0 \approx 11,5$ с, а при $a = 0,4g$ (m/c^2) $t_0 = 0,2$ с. Время затухания изгибных колебаний также сокращается при увеличении максимальных ускорений от 28 с при $a = 0,2g$ до 14 с при $a = 0,4g$.

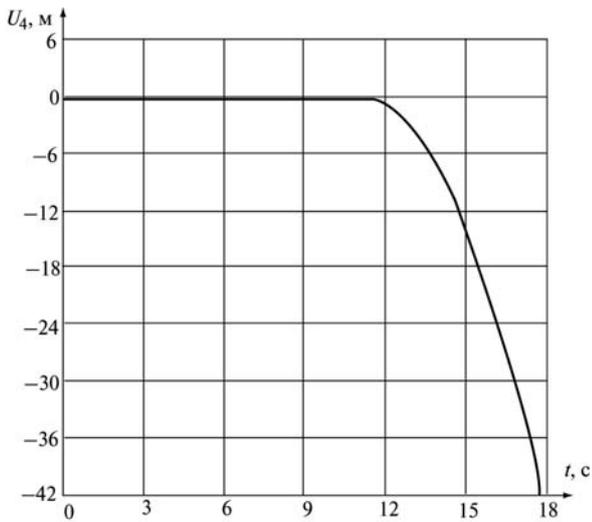


Рис. 7. Изменения перемещения козлового крана во времени

Максимальные перемещения x_1 и x_3 с увеличением значения a возрастают. Растет скорость движения крана \dot{u}_4 . Так, например, расстояние $u_4 = 42$ м кран проходит за время 18 с при $a = 0,2g$ и за 6 с при $a = 0,4g$.

На рисунке 8 представлено изменение во времени максимальных напряжений в сечении посередине пролета при $a = 0,2g$. Резкий скачок напряжений в момент $t_0 = 11,5$ с связан с изменением динамической модели за счет начала передвижения крана. Для сравнения на рис. 9 показано как изменятся напряжения, если расчет произвести в предположении, что кран не может перемещаться относительно земли. Такое же сравнение напряжений в сечении над опорой приведено на рис. 10, 11.

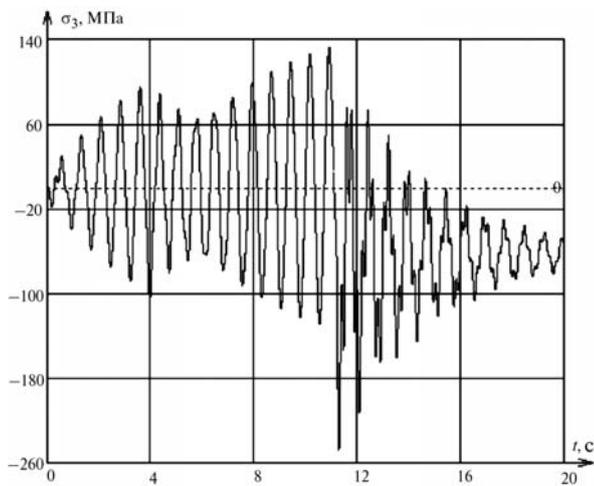


Рис. 8. Изменения максимальных напряжений в сечении посередине пролета с учетом возможности передвижения крана при $a = 0,2g$

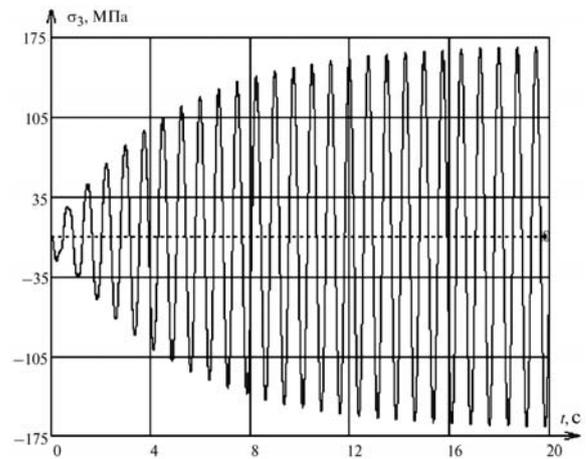


Рис. 9. Изменения максимальных напряжений в сечении посередине пролета без учета возможности передвижения крана при $a = 0,2g$

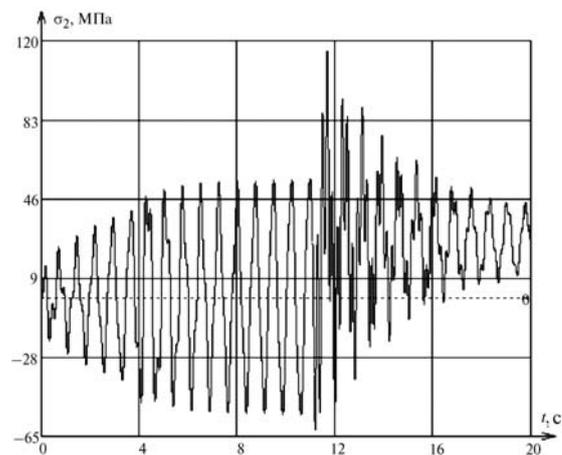


Рис. 10. Изменения максимальных напряжений в сечении над опорой с учетом возможности передвижения крана при $a = 0,2g$

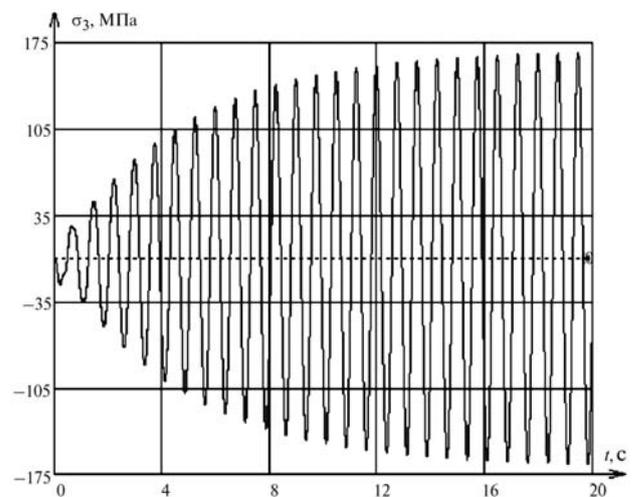


Рис. 11. Изменения максимальных напряжений в сечении над опорой без учета возможности передвижения крана при $a = 0,2g$

Таким образом, расчеты показали, что при учете возможности передвижения кранов вдоль подкрановых путей максимальные напряжения изменяются во времени по другому закону, при этом максимальные напряжения иногда оказываются больше тех значений, которые получаются при расчетах, в которых краны предполагаются неподвижными.

Выводы

В результате анализа полученных расчетных данных удалось установить следующее.

1. При действии сейсмических нагрузок в кранах мостового типа не только возникают изгибные колебания балок моста, но даже при полностью заторможенных ходовых колесах краны начинают перемещаться по рельсам.

2. На первых этапах действия сейсмических ускорений $a \sin(\omega t)$ силы трения ходовых колес по рельсам F_T оказываются больше суммы всех динамических нагрузок F_d^Σ , действующих на краны. При этом краны не перемещаются относительно земли. Время этих этапов t_0 зависит от величины максимального ускорения земли a .

3. Перемещение крана начинается, когда сумма всех динамических нагрузок на кран становится больше силы трения ($F_d^\Sigma > F_T$). Направление этого перемещения имеет случайный характер. Оно зависит от того, какие нагрузки в момент времени t_0 окажутся большими и при этом каково их направление.

4. Перемещение крана по рельсам происходит со скоростью, возрастающей во времени. Значения перемещений за один и тот же отрезок времени зависят от величины максимального ускорения a и частоты колебаний ω .

5. Внезапно возникающие ускорения земли вызывают изгибные колебания балок крановых мостов. Вследствие наличия сил сухого трения между колесами и рельсами эти колебания происходят в виде чередования ряда аналогичных периодов:

1) этапов «застоя», при которых отсутствуют перемещения кранов по рельсам;

2) этапов, при которых колебания крановых металлоконструкций происходят одновременно с перемещениями их по рельсам.

6. Максимальные напряжения от изгиба в балках крановых мостов, возникающие в моменты начала проскальзывания кранов по рельсам, могут быть существенно больше тех,

что получаются при использовании существующих методов расчета.

7. Вследствие наличия сухого трения между колесами и рельсами, а также за счет конструкционного демпфирования и внутреннего трения в материале, изгибные колебания балок затухают. Время затухания колебаний зависит от распределения приведенных масс, от жесткости крановых металлоконструкций и от величины максимального ускорения земли a . После затухания колебаний краны продолжают двигаться по рельсам, имея незначительные прогибы и соответствующие напряжения.

В заключение следует отметить, что реальные акселерограммы, получаемые при замерах действительных ускорений земли во время землетрясений, свидетельствуют о случайном характере их изменения. Рекомендации ГОСТ [1] по замене этих случайных процессов синусоидальным законом приводят к увеличению значений максимальных расчетных напряжений, возникающих при резонансе в случае совпадения частоты колебаний земли с низшей частотой собственных колебаний крана. Но эта замена не влияет на основной вывод данного исследования о том, что при сейсмическом воздействии краны мостового типа начинают перемещаться вдоль подкрановых путей со скоростью, зависящей от величины максимального ускорения земли.

Литература

1. ГОСТ 30546.1—98. Общие требования к машинам, приборам и другим техническим изделиям и методы расчета сложных конструкций в части сейсмостойкости.

2. Бирбрайер А.Н., Шульман С.Г. Прочность и надежность конструкций АЭС при особых динамических воздействиях. М.: Энергоиздат, 1989. С. 37—61.

3. Методические указания. Нормы расчета пространственных металлоконструкций грузоподъемных кранов атомных станций на эксплуатационные и сейсмические воздействия. РД 24.090.83—87. Минтяжмаш, руководящий документ по стандартизации. С. 41—62.

4. Геккер Ф.Р. Динамика машин, работающих без смазочных материалов. М.: Машиностроение, 1983. С. 64—84.

5. Феодосьев В.И. Сопrotивление материалов. М.: Наука, 1983. С. 203—207, 222—249.

6. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний. М.: Высшая школа, 1980. С. 90.

Статья поступила в редакцию 08.12.2011