

DOI 10.8562/JEST.214.25
УДК 621.873

П.А. Гаврилов

УЧЕТ ФИЗИЧЕСКОЙ И ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ ПРИ РАСЧЕТЕ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ КРАНОВЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

P.A. Gavrilov

SEISMIC ANALYSIS OF CRANES REGARDING GEOMETRIC AND PHYSICAL NONLINEARITIES

В работе рассматривается вопрос учета нелинейных характеристик динамических моделей при расчете сейсмостойкости грузоподъемных кранов общего назначения. Проведено экспериментальное исследование влияния геометрической и физической нелинейностей на параметры колебаний динамической системы. Составлен ряд математических моделей, описывающих колебательный процесс нелинейной динамической системы. Проведен сравнительный анализ влияния различных нелинейностей на параметры колебательного процесса.

СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ; КРАН ГРУЗОПОДЪЕМНЫЙ; ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ; НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ.

The paper studies the problem of factoring geometric and physical nonlinearities in seismic analysis of cranes. Experimental study of factoring nonlinear characteristics of dynamics model was conducted. A series of mathematic models were developed to describe different ways of linearization of the experimental model. Comparison of results shows that physical nonlinearity of wire ropes is not required as a factor in the seismic analysis of cranes. Herewith contacts between wheel and rail and one-sided stiffness of wire ropes are required to be taken into account. Any liberalization of dynamic model entails deviation of stresses, displacements and accelerations as results of the analysis.

SEISMIC ANALYSIS, CRANE, EKSPERIMENTAL STUDY, NONLINEAR DYNAMICS MODEL.

Введение

Расчет сейсмостойкости металлических конструкций грузоподъемных кранов, не относящихся к оборудованию атомных станций, регламентируется нормативными документами [1] и [2]. Оба эти документа устанавливают возможные способы анализа сейсмостойкости конструкции: расчет методом разложения по собственным формам (в соответствии с линейно-спектральной теорией сейсмостойкости Био — Беньоффа [3], [4]) и расчет методом прямого интегрирования системы дифференциальных уравнений. Линейно-спектральная теория сейсмостойкости позволяет определить дополнительные сейсмические нагрузки на конструкцию, используя в качестве исходных данных так называемые спектры ответа основания крана (конструкции) и магнитуду проектного землетрясения (ПЗ). Методика

расчета по линейно-спектральной теории сейсмостойкости описана в [5]. Для прямого динамического анализа конструкции исходными данными служат записанные либо синтезированные акселерограммы, велосигграммы или сейсмограммы землетрясений и магнитуда ПЗ.

В инженерной практике зачастую расчет металлических конструкций грузоподъемных кранов на прочность, жесткость и устойчивость проводят с использованием метода конечных элементов (МКЭ). Поэтому в условиях растущих вычислительных мощностей и снижения трудовых затрат на расчет все большее распространение получают прямые динамические методы. Решение дифференциальных уравнений при помощи численных методов может позволить более точно определять динамические коэффициенты по перемещениям, напряжениям

и усилиям и, как следствие, снизить металлоемкость и стоимость конструкции крана.

Однако вышеуказанная нормативная литература не дает конкретных указаний по выбору динамических моделей для сейсмического анализа грузоподъемного крана, отсутствуют рекомендации, как учитывать односторонние связи (контактная пара «рельс — колесо», грузовой канат) и нелинейный характер деформирования элементов подвеса груза. Этот пробел можно объяснить тем, что линейно-спектральная теория сейсмостойкости была разработана для строительных конструкций, где подобные нелинейности встречаются значительно реже, чем в крановых металлоконструкциях, и в расчете не учитываются. Однако применительно к грузоподъемным машинам эти факторы могут играть весьма значительную роль. Проблема учета геометрической и физической нелинейностей при сейсмическом расчете грузоподъемных кранов активно обсуждается в научных кругах [6–8]. Предлагаются математические модели и методы их решения, позволяющие учесть возможный подскок колес тележки и крана на рельсе, одностороннюю работу канатов, физические нелинейности конструкционных материалов и т. д. Актуальность исследований в данной об-

ласти обусловлена необходимостью повышения безопасности грузоподъемных машин, эксплуатируемых в сейсмически опасных зонах.

Предлагаемая статья посвящена исследованию влияния физической и геометрической нелинейностей в динамической системе применительно к расчету сейсмостойкости грузоподъемных кранов. Конечной целью исследования является разработка рекомендаций по учету нелинейных свойств металлических конструкций грузоподъемных кранов общего назначения при проведении их сейсмического анализа. Программа работы включала экспериментальное исследование, математическое моделирование и анализ результатов.

Постановка эксперимента

Экспериментальная модель имитирует конструкцию мостового крана, воспринимающую вертикальные колебания, и схематизируется как трехмассовая геометрически и физически нелинейная динамическая система. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Основные элементы модели условно именуется мостом 3, тележкой 4 и грузом 6. Мост закреплен в шарнирных опорах 1 и 2, при этом подвижная опора 2 также позволяет

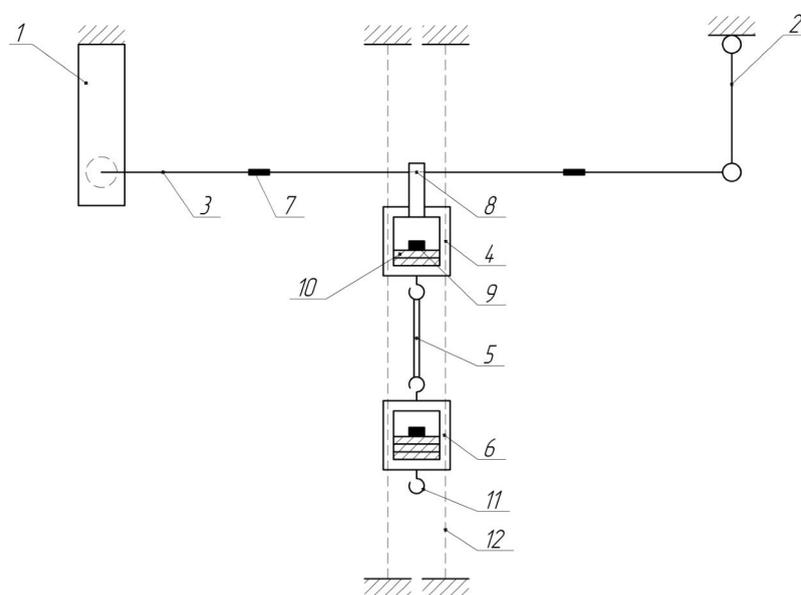


Рис. 1 Схема экспериментальной установки: 1 — неподвижная опора; 2 — подвижная опора; 3 — мост; 4 — подвеска «тележка»; 5 — гибкий подвес; 6 — подвеска «груз»; 7 — тензометр; 8 — датчик подскока; 9 — акселерометр; 10 — дополнительный груз; 11 — крюк; 12 — направляющие тросы

мосту перемещаться в направлении собственной продольной оси. На мосту закреплены тензометрические датчики 7 на расстоянии в четверть пролета от опор. В центре пролета моста находится тележка. Тележка имеет возможность подскока на мосту. В случае отрыва тележки от моста срабатывает датчик 8, фиксирующий факт подскока. Таким образом, в эксперименте моделируется связь колес тележки с рельсом. На тележке закреплены грузы 10 и акселерометр 9, измеряющий вертикальные ускорения подвески, возникающие в процессе колебаний. Для исключения раскачивания тележки из вертикальной плоскости используются направляющие тросы 12, натянутые вдоль вертикальной оси и проходящие сквозь специальные отверстия в тележке. Посредством гибкого упругого подвеса 5, изготовленного из резины, к тележке крепится подвеска, именуемая в эксперименте грузом. Она, как и тележка, снабжена акселерометром для регистрации ускорений и дополнительными тарированными грузами. При помощи крюка 11, установленного на нижней подвеске, вся система перед началом эксперимента оттягивалась вниз и закреплялась. Началом замеров служит момент, когда обрывается эта связь (перерезается нить, связывающая груз с основанием).

Общие характеристики экспериментальной модели: пролет моста — 1520 мм; масса моста — 0,503 кг; масса подвески «тележка» с акселерометром и дополнительными грузами — 1,9 кг;

масса подвески «груз» с акселерометром и дополнительными грузами — 2,63 кг.

Для определения реальной диаграммы растяжения гибкого подвеса была проведена серия замеров удлинения образца при различных нагрузках. На рис. 2 приведен график зависимости жесткости гибкого подвеса от абсолютного удлинения. Интерполирующая кривая описывается следующим выражением, содержащим условный оператор:

$$y(x) = \begin{cases} a + be^{-cx}, & \text{если } x \geq d; \\ C3, & \text{если } 0 \leq x < d; \\ 0 & \text{в остальных случаях,} \end{cases} \quad (1)$$

где $a = 0,34$ Н/мм; $b = 2,5$ Н/мм; $c = 0,02$; $d = 82$ мм; $C3 = 0,87$ Н/мм.

Результатами эксперимента служат записи тензометрии, датчика подскока и акселерометров.

В проведенном эксперименте проявилось влияние геометрической (подскок груза и тележки) и физической (изменение жесткости гибкого подвеса) нелинейностей.

Математическое моделирование

В соответствии с исходными данными эксперимента в программе MathCAD был составлен ряд математических моделей, описывающих колебания трехмассовой динамической системы. Были составлены четыре модели: 1) линейная динамическая модель; 2) физически нели-

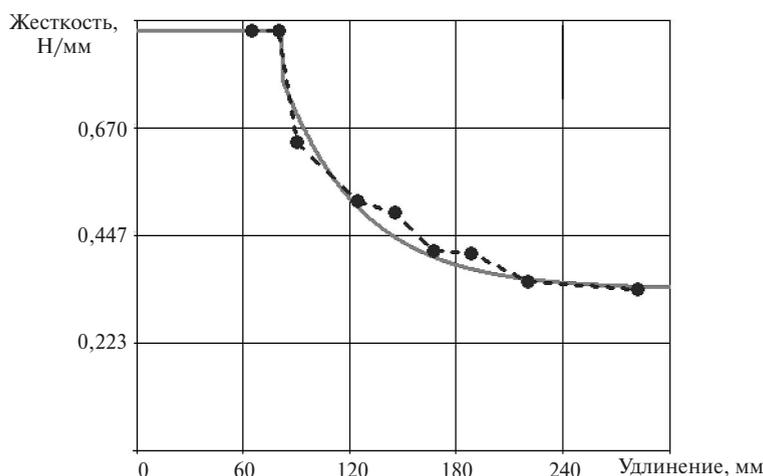


Рис. 2. График зависимости упругости гибкого подвеса от удлинения
(— — интерполяция; ●● — эксперимент)

нейная динамическая модель, учитывающая реальный характер растяжения гибкого подвеса; 3) геометрически нелинейная динамическая модель, учитывающая возможность подскока груза на гибком подвесе и тележки на мосту; 4) физически и геометрически нелинейная динамическая модель. Схема трехмассовой динамической системы представлена на рис. 3.

Математические модели составлены на основе уравнения Лагранжа второго рода, имеющего вид

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

где $[M]$ — матрица масс конструкции; $[C]$ — матрица демпфирования; $[K]$ — матрица жесткости; $\{R\}$ — известный вектор внешней нагрузки, зависящий от времени; $\{u\}$ — неизвестный вектор перемещений масс модели, зависящий от времени.

Системы дифференциальных уравнений решались численно в программе MathCAD 14 с при помощи решателя Радау, использующего одноименный алгоритм. Для всех математических моделей рассеяние энергии в процессе колебаний учитывается посредством эквивалентного вязкого трения. Коэффициент вязкого трения был определен из условия равенства времени затухания колебаний экспериментальной и математической модели. Для всех нижеприведенных математических моделей коэффициент эквивалентного вязкого трения равен $\mu = 5$ кг/с.

Линейная динамическая модель — наиболее простая из всех представленных. Система дифференциальных уравнений описывает колебания трехмассовой динамической системы:

$$\begin{cases} \ddot{X}1(t)m1 + c1\dot{X}1(t) - c2(X2(t) - X1(t)) + \\ + \mu\dot{X}1(t) - \mu(\dot{X}2(t) - \dot{X}1(t)) = gm1; \\ \ddot{X}2(t)m2 + c2(X2(t) - X1(t)) - \\ - C3(X3(t) - X2(t)) + \mu(\dot{X}2(t) - \dot{X}1(t)) - \\ - \mu(\dot{X}3(t) - \dot{X}2(t)) = gm2; \\ \ddot{X}3(t)m3 + C3(X3(t) - X2(t)) + \\ + \mu(\dot{X}3(t) - \dot{X}2(t)) = gm3. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь $c1$ — жесткость моста, Н/мм; $c2$ — жесткость контактной пары «тележка — мост», Н/мм; $C3$ — эквивалентная жесткость гибкого подвеса, Н/мм; $X1(t)$, $X2(t)$, $X3(t)$ — обобщенные координаты соответственно моста, тележки и груза, мм; $m1$ — приведенная масса моста, кг; $m2$, $m3$ — массы

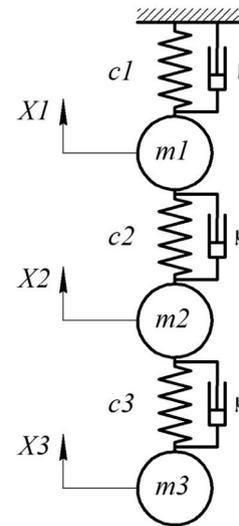


Рис. 3. Схема динамической системы

тележки и груза, включая акселерометры, кг; g — ускорение свободного падения, мм/с²; μ — коэффициент вязкого трения, кг/с.

Жесткость гибкого подвеса $c3(t)$ в данном случае принята постоянной. Наибольшее время колебаний приходится на линейный ненулевой участок диаграммы, представленной на рис. 2, но в начальный момент времени жесткость гибкого подвеса вычисляется согласно формуле (1). Эквивалентная жесткость, использованная при физической линеаризации модели, принята как среднее значение вышеуказанных величин:

$$C3 = \frac{y(X2(0) - X3(0)) + C3}{2} = 0,68 \text{ Н/мм.}$$

Система (3) была решена при следующих начальных условиях:

$$\begin{cases} \dot{X}1(0) = 0 \text{ мм/с;} \\ \dot{X}2(0) = 0 \text{ мм/с;} \\ \dot{X}3(0) = 0 \text{ мм/с;} \\ X1(0) = -69,3 \text{ мм;} \\ X2(0) = -69,3 \text{ мм;} \\ X3(0) = -188,2 \text{ мм.} \end{cases}$$

Геометрическая нелинейность в данном исследовании представлена в виде так называемых выключающихся связей. Имеется в виду односторонняя работа жесткостей c_2 и c_3 только на растяжение. В противном случае жесткости обращаются в ноль и не создают реактивных уси-

лий, влияющих на колебательный процесс. При этом, учитывая специфику экспериментальной установки, диссипативные элементы сохраняют свои функции при любом значении относительных смещений масс относительно друг друга.

Переменная жесткость представлена в математической модели как непрерывная дифференцируемая функция

$$c(x) = \frac{C}{\pi} \arctg(xk) + \frac{C}{2}, \quad (5)$$

где C — максимальное постоянное значение жесткости, Н/мм; k — коэффициент, определяющий крутизну функции.

Система дифференциальных уравнений, описывающих геометрически нелинейную динамическую систему:

$$\begin{cases} \ddot{X}1(t)m1 + c1X1(t) - c2(t)(X2(t) - X1(t)) + \\ + \mu\dot{X}1(t) - \mu(\dot{X}2(t) - \dot{X}1(t)) = gm1; \\ \ddot{X}2(t)m2 + c2(t)(X2(t) - X1(t)) - \\ - c3(t)(X3(t) - X2(t)) + \mu(\dot{X}2(t) - \\ - \dot{X}1(t)) - \mu(\dot{X}3(t) - \dot{X}2(t)) = gm2; \\ \ddot{X}3(t)m3 + c3(t)(X3(t) - X2(t)) + \\ + \mu(\dot{X}3(t) - \dot{X}2(t)) = gm3; \\ c2(t) = \frac{C2}{\pi} \arctg((X1(t) - X2(t))k) + \frac{C2}{2}; \\ c3(t) = \frac{C3}{\pi} \arctg((X2(t) - X3(t))k) + \frac{C3}{2}, \end{cases} \quad (6)$$

где $k = 1000$ — безразмерный коэффициент крутизны функции жесткости.

Система (6) была решена при следующих начальных условиях:

$$\begin{cases} \dot{X}1(0) = 0 \text{ мм/с}; \\ \dot{X}2(0) = 0 \text{ мм/с}; \\ \dot{X}3(0) = 0 \text{ мм/с}; \\ X1(0) = -69,3 \text{ мм}; \\ X2(0) = -69,3 \text{ мм}; \\ X3(0) = -188,2 \text{ мм}; \\ c2(0) = 10000 \text{ Н/мм}; \\ c3(0) = 0,68 \text{ Н/мм}. \end{cases} \quad (70)$$

При геометрической линеаризации модели переменная жесткость гибкого подвеса груза моделируется согласно уравнению (2) с той разницей, что аргументом функции является абсолютное значение аргумента:

$$yd(x) = \begin{cases} a + be^{-c|x|}, & \text{если } |x| \geq d; \\ C3 & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (8)$$

Система дифференциальных уравнений, описывающая физически нелинейную систему, имеет вид

$$\begin{cases} \ddot{X}1(t)m1 + c1X1(t) - c2(X2(t) - X1(t)) + \\ + \mu\dot{X}1(t) - \mu(\dot{X}2(t) - \dot{X}1(t)) = gm1; \\ \ddot{X}2(t)m2 + c2(X2(t) - X1(t)) - \\ - c3(t)(X3(t) - X2(t)) + \mu(\dot{X}2(t) - \\ - \dot{X}1(t)) - \mu(\dot{X}3(t) - \dot{X}2(t)) = gm2; \\ \ddot{X}3(t)m3 + c3(t)(X3(t) - X2(t)) + \\ + \mu(\dot{X}3(t) - \dot{X}2(t)) = gm3; \\ c3(t) = \begin{cases} a + be^{-c(X1(t) - X2(t))}, & \text{если } |X1(t) - X2(t)| \geq d; \\ C3 & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

Система (13) была решена при следующих начальных условиях:

$$\begin{cases} \dot{X}1(0) = 0 \text{ мм/с}; \\ \dot{X}2(0) = 0 \text{ мм/с}; \\ \dot{X}3(0) = 0 \text{ мм/с}; \\ X1(0) = -69,3 \text{ мм}; \\ X2(0) = -69,3 \text{ мм}; \\ X3(0) = -211,6 \text{ мм}; \\ c3(0) = yd(X2(0) - X3(0)) \text{ Н/мм}. \end{cases} \quad (10)$$

Геометрически и физически нелинейная математическая модель содержит в себе все указанные виды нелинейностей и описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \ddot{X}1(t)m1 + c1X1(t) - c2(t)(X2(t) - X1(t)) + \\ + \mu\dot{X}1(t) - \mu(\dot{X}2(t) - \dot{X}1(t)) = gm1; \\ \ddot{X}2(t)m2 + c2(t)(X2(t) - X1(t)) - \\ - c3(t)(X3(t) - X2(t)) + \mu(\dot{X}2(t) - \dot{X}1(t)) - \\ - \mu(\dot{X}3(t) - \dot{X}2(t)) = gm2; \\ \ddot{X}3(t)m3 + c3(t)(X3(t) - X2(t)) + \\ + \mu(\dot{X}3(t) - \dot{X}2(t)) = gm3; \\ c2(t) = \frac{C2}{\pi} \arctg((X1(t) - X2(t))k) + \frac{C2}{2}; \\ c3(t) = \begin{cases} a + be^{-c(X1(t) - X2(t))}, & \text{если } (X1(t) - X2(t)) \geq d; \\ C3, & \text{если } 0 < (X1(t) - X2(t)) < d; \\ 0 & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \end{cases} \quad (11)$$



Начальные условия, при которых была решена система (11):

$$\begin{cases} \dot{X}1(0) = 0 \text{ мм/с;} \\ \dot{X}2(0) = 0 \text{ мм/с;} \\ \dot{X}3(0) = 0 \text{ мм/с;} \\ X1(0) = -69,3 \text{ мм;} \\ X2(0) = -69,3 \text{ мм;} \\ X3(0) = -211,6 \text{ мм;} \\ c2(0) = 10000 \text{ Н/мм;} \\ c3(0) = \gamma(X2(0) - X3(0)) \text{ Н/мм.} \end{cases} \quad (12)$$

Анализ результатов исследования

При проведении эксперимента, как сказано ранее, регистрировались следующие параметры колебаний установки:

напряжения на поверхности стержня в точках крепления тензометров;
вертикальные ускорения тележки;

вертикальные ускорения груза;
отрыв тележки от моста.

В данном случае напряжения, регистрируемые тензометрическими датчиками, будут прямопропорциональны перемещениям центральной точки пролета моста. На рис. 4–6 приведены сравнительные графики перемещений центральной точки моста, ускорений тележки и ускорений груза в процессе колебаний.

С учетом требований инженерного анализа сравнение результатов эксперимента с аналитическими расчетами проведено по следующим параметрам:

размаху первой волны колебаний перемещений моста А;
продолжительности подскока;
размаху колебаний ускорений тележки без учета первой полуволны.
размаху колебаний ускорений груза без учета первой полуволны. Результаты сравнения различных математических моделей с экспериментальными данными приведены в табл. 1.

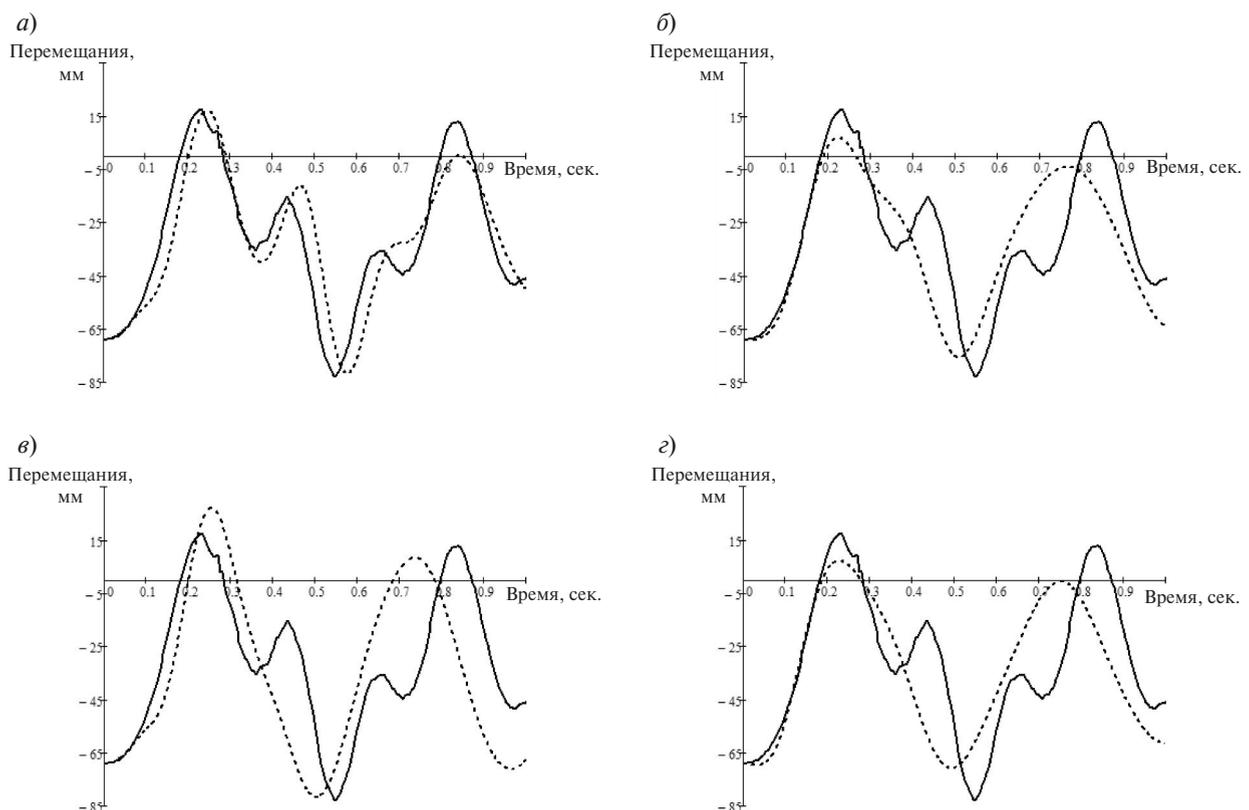


Рис. 4. Зависимость перемещений моста от времени: — — эксперимент; ---- — модель
(а — физически и геометрически нелинейная; б — геометрически нелинейная;
в — физически нелинейная; г — линейная)

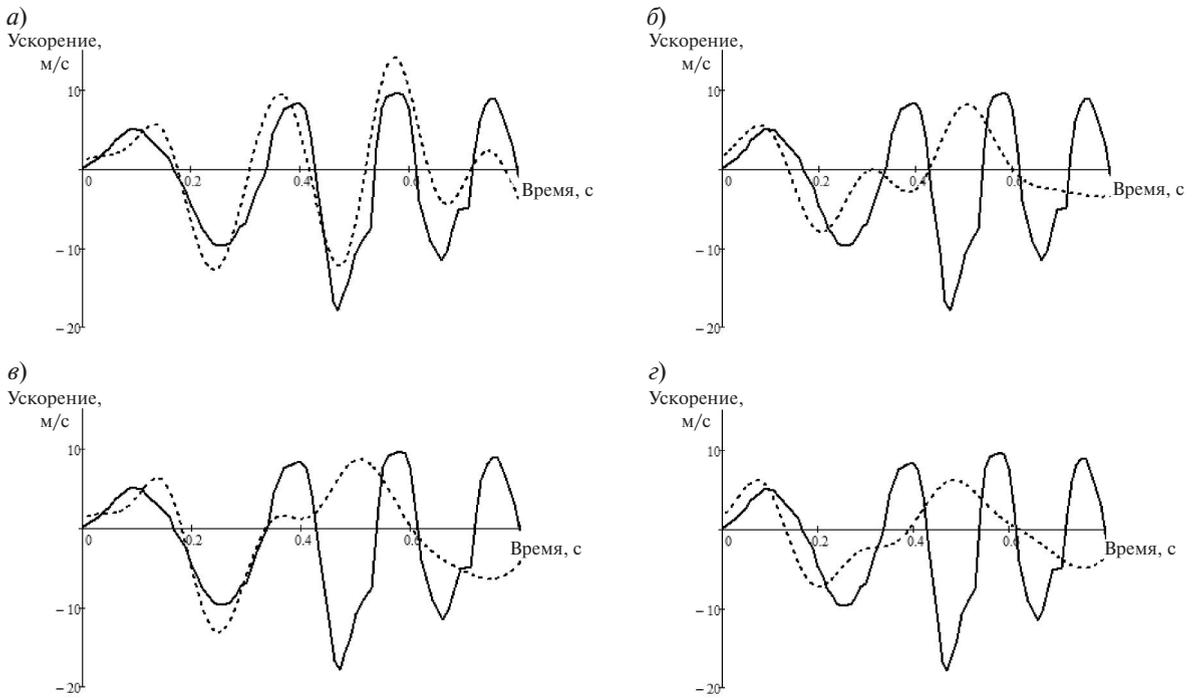


Рис. 5. Зависимость ускорений тележки от времени: — — эксперимент; ---- — модель
 (а — физически и геометрически нелинейная; б — геометрически нелинейная;
 в — физически нелинейная; г — линейная)

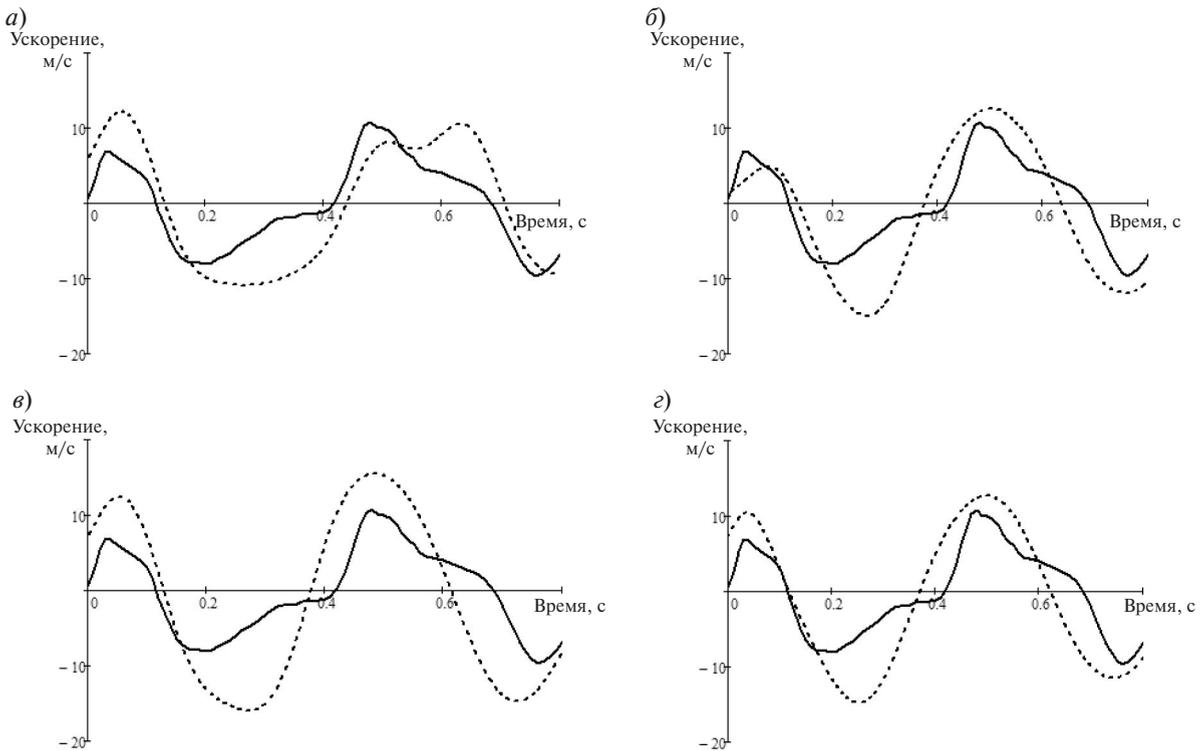


Рис. 6. Зависимость ускорений груза от времени: — — эксперимент; ---- — модель
 (а — физически и геометрически нелинейная; б — геометрически нелинейная;
 в — физически нелинейная; г — линейная)

Таблица 1

Параметры, характеризующие движение моста с грузом, полученные экспериментально и по различным моделям

Способ нахождения параметров	Размах перемещений моста		Размах ускорений тележки		Размах ускорений груза		Продолжительность подскока	
	Величина, мм	Отклонение, %	Величина, м/с ²	Отклонение, %	Величина, м/с ²	Отклонение, %	Величина, с	Отклонение, %
Эксперимент	86,3	—	17,8	—	18,8	—	0,06	—
Нелинейная модель	86,4	0,1	22,2	24,7	18,9	0,5	0,065	8,3
Линейная геометрия	96,3	11,6	21,8	22,5	31,4	67,0	0,146	143,3
Линейная жесткость	76,1	—11,8	16,1	—9,6	27,5	46,3	0,038	—36,7
Линейная модель	76,5	—11,4	13,3	—25,3	27,5	46,3	0,023	—61,7

Из результатов исследования видно, что нелинейная математическая модель наилучшим образом описывает процесс колебаний экспериментальной установки. Линеаризация модели приводит к значительному изменению критериевых параметров, по которым проводится сравнение моделей, и меняет характер колебательного процесса системы. Вне всякого сомнения, сейсмический расчет крана не предполагает наиболее точного вида анализа в силу отсутствия возможности предсказать входное воздействие. Поэтому такой расчет следует проводить с прицелом на запас прочности, намеренно завышая некоторые результаты. Интерес представляет выбор математической модели и ее линеаризация. Рассмотрим варианты линеаризации математической модели, используемой в расчете сейсмостойкости грузоподъемного крана, опираясь на результаты экспериментального исследования.

Стальные канаты, используемые в грузоподъемной технике, зачастую имеют жесткость, значительно превышающую жесткость конструкции крана. Коэффициент запаса, принимаемый для канатов, обычно находится в диапазоне $n = 4-25$ [9] в зависимости от режима работы крана, назначения каната и прочих особенностей конкретной установки. Как показано в [10], нелинейные свойства канатов проявляются при сравнительно больших по отношению к разрушающему усилию нагрузках, при коэффициенте запаса прочности близком к 3. В силу сказанного можно предположить нецелесообразность моделирования

нелинейных свойств стальных канатов в расчетах сейсмостойкости грузоподъемных кранов общего назначения при отсутствии дополнительных требований к точности расчета.

Геометрическая линеаризация модели в данном исследовании привела к завышению всех оценочных критериев, в значительной степени изменился характер колебаний системы.

Построение физически и геометрически нелинейной модели грузоподъемного крана экономически нецелесообразно. Учет физической нелинейности основного материала несущих конструкций не требуется проектировщику в силу недопустимости ситуации, когда расчетные напряжения в металле выходят в область текучести. Моделирование нелинейных свойств стальных канатов также нецелесообразно по причинам, описанным выше. Однако геометрическая линеаризация конструкции крана необоснованно завысит коэффициенты запаса, что приведет к удорожанию крана в целом.

Выводы

Результаты проведенного исследования можно резюмировать так:

Экспериментальное исследование показало, что физическая и геометрическая линеаризация математической модели, описывающей процесс свободных затухающих колебаний трехмассовой динамической системы, приводит к отклонению расчетных перемещений и ускорений от истинных на величину 11–67 %.

С точки зрения трудозатрат и целесообразности наиболее предпочтительна физическая линеаризация жесткости грузовых канатов, как не оказывающая значительного влияния на результат динамического анализа.

Можно сделать вывод о необходимости учета односторонних связей (стальные канаты, контакт колеса с рельсом) при расчете сейсмостойкости грузоподъемного оборудования общего назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ 30546.1–98.** Общие требования к машинам, приборам и другим техническим изделиям и методы расчета их сложных конструкций в части сейсмостойкости. Минск: ИПК Издательство стандартов, 1998.
2. **СНиП II-7–81*.** Строительство в сейсмически районах. Москва, 2011.
3. **Biot M.A.** Theory of elastic systems vibrating under transient impulse with an application to earthquake-proof buildings // *Proc Nat Acad Sci.* 1933. No. 19(2). Iss. 262. P. 8.
4. **Biot M.A.** Theory of vibration of buildings during earthquakes // *Zeitschrift für Angewandte Matematik und Mechanik.* 1934. № 14(4). Iss. 213. P. 23.
5. **Бирбраер А.Н.** Расчет конструкций на сейсмостойкость. СПб.: Наука, 1998.
6. **Kobayashi N., Kuribara H., Honda T., Watanabe M.** Nonlinear Seismic Responses of Container Cranes Including the Contact Problem Between Wheels and Rails // *Journal of Pressure Vessel Technology.* 2004. №126(1). P. 59–65.
7. **Suzuki K., Inagaki M., Iijima T.** Seismic Capacity Test of Overhead Crane Under Horizontal and Vertical Excitation // *Journal of Disaster Research.* 2010. № 4. P. 369–377.
8. **Синельщиков А.В.** Основы теории сейсмостойкости подъемных сооружений // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки.* 2009. №2, Т. 1. С. 133–141.
9. **Брауде В.И., Гохберг М.М., Звягин И.Е., Ковин А.А., Орлов А.Н., Плавник Б.И., Серлин Л.Г., Сиротский В.Ф., Соколов С.А., Тархов А.И., Юшкевич В.Н.** Справочник по кранам. Т. I. М.: Машиностроение, 1988. 536 с.
10. **Малиновский В.А.** Стальные канаты. Часть I: Некоторые вопросы технологии, расчета и проектирования. Одесса: Асптропринт, 2001. 188 с.

REFERENCES

1. **GOST 30546.1–98.** Obshchiye trebovaniya k mashinam, priboram i drugim tekhnicheskim izdeliyam i metody rascheta ikh slozhnykh konstruksiy 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: IPK Izdatelstvo standartov, 1998. (rus.)
2. **SNiP II-7–81*.** Stroitelstvo v seysmicheski rayonakh [Building Codes Of Russia. Seismic building design code]. Moscow, 2011. (rus.)
3. **Biot M.A.** Theory of elastic systems vibrating under transient impulse with an application to earthquake-proof buildings. *Proc Nat Acad Sci.* 1933. № 19(2). Iss. 262. P. 8.
4. **Biot M.A.** Theory of vibration of buildings during earthquakes. *Zeitschrift für Angewandte Matematik und Mechanik.* 1934. № 14(4). Iss. 213. P. 23.
5. **Birbrayer A.N.** Raschet konstruksiy na seysmostoykost [Seismic analysis of structures]. SPb.: Nauka, 1998.
6. **Kobayashi N., Kuribara H., Honda T., Watanabe M.** Nonlinear Seismic Responses of Container Cranes Including the Contact Problem Between Wheels and Rails. *Journal of Pressure Vessel Technology.* 2004. № 126(1). P. 59–65.
7. **Suzuki K., Inagaki M., Iijima T.** Seismic Capacity Test of Overhead Crane Under Horizontal and Vertical Excitation. *Journal of Disaster Research.* 2010. № 4. P. 366–377.
8. **Sinelshchikov 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.)
9. **Braude V.I., Gokhberg M.M., Zvyagin I.Ye., Kovin A.A., Orlov A.N., Plavnik B.I., Serlin L.G., Sirotskiy V.F., Sokolov S.A., Tarkhov A.I., Yushkevich V.N.** Spravochnik po kranam [Handbook on cranes]. Vol. I. Moscow: Mashinostroyeniye, 1988. 536 s. (rus.)
10. **Malinovskiy V.A.** Stalnyye kanaty. Chast I: Nekotoryye voprosy tekhnologii, rascheta i proyektirovaniya [Steel wire ropes. Volume 1. Some questions of technology, calculation and design]. Odessa: Asptroprint, 2001. 188 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ГАВРИЛОВ Петр Александрович — аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: issahel@mail.ru

AUTHOR

GAVRILOV Petr A. — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: issahel@mail.ru