

## **МНОГОФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ПОДЪЕМА ГРУЗА АВТОМОБИЛЬНЫМ КРАНОМ**

### **1. Постановка проблемы**

Грузоподъемные машины работают в режиме повторно-кратковременного включения механизмов, характеризующемся частыми пусками и остановками. Переходные процессы оказывают одно из решающих влияний на показатели работы кранов. Исследование переходных процессов с целью установления закономерностей возникновения динамических нагрузок является актуальной задачей в деле повышения технико-эксплуатационных показателей работы грузоподъемных машин.

### **2. Анализ публикаций**

Анализ публикаций [1, 2, 3] свидетельствует, что часть теоретических вопросов динамики грузоподъемных машин требует дальнейшего развития: так, применение многофакторного анализа динамики кранов позволит установить влияние и взаимное влияние различных факторов на переходные процессы и, следовательно, осуществлять рациональное проектирование или модернизацию крановых механизмов.

### **3. Цель статьи**

Целью данной статьи является анализ переходных процессов при подъеме груза с жесткого основания автомобильным краном с помощью численного интегрирования уравнений движения.

### **4. Основная часть**

Динамическую модель механизма подъема автомобильного крана представим в виде трехмассовой двухсвязной эквивалентной схемы (рис.1). Массу стрелы крана представим в виде приведенной к оголовку стрелы сосредоточенной массы [1], соединенной упруго-вязкой связью,

характеризирующуюся коэффициентом жесткости стрелы и стрелового каната, а также демпфирования металлоконструкции.

Подъем груза с жесткого основания можно разделить на три этапа: первый - этап холостого хода, когда масса вращающихся частей привода  $m_{\Pi}$  под воздействием силы привода  $P_{dq}$  выбирает суммарный зазор  $\Delta_k$  в канатах и приводе; второй этап - развитие нагрузки в канатах до усилия в них, равного весу груза  $Q$ , причем масса  $m_{\Gamma}$  на протяжении второго этапа находится в состоянии покоя; третий этап - совместное движение всех упруго связанных масс системы.

На первом этапе выбирается зазор  $\Delta_k$  в канатах и приводе, а динамические нагружения в металлоконструкции и в канатах отсутствуют.

Второй этап движения описывается уравнениями

$$\begin{aligned} m_{\Pi} \cdot \frac{d^2 y_{\Pi}}{dt^2} + P_{K2} - P_{dq} &= 0; \\ m_c \cdot \frac{d^2 y_c}{dt^2} - P_{K2} + k_D \cdot \frac{dy_c}{dt} + c_c \cdot y_c &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

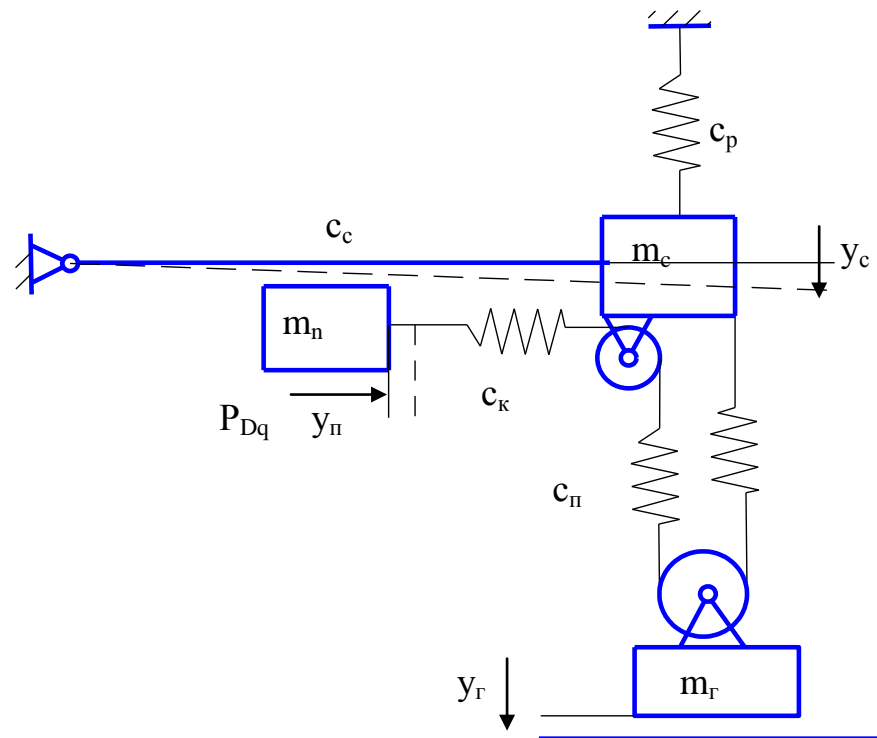
Заканчивается второй этап движения при натяжении грузовых канатов

$$P_{K2} = c_c (y_{\Pi} - y_c) + k'_D (y_{\Pi} - \dot{y}_c) = Q.$$

Третий этап движения описывается уравнениями:

$$\begin{aligned} m_{\Pi} \cdot \frac{d^2 y_{\Pi}}{dt^2} + P_{K3} - P_{dq} &= 0, \\ m_c \cdot \frac{d^2 y_c}{dt^2} - P_{K3} + k_D \cdot \frac{dy_c}{dt} + c_c \cdot y_c &= 0, \\ m_{\Gamma} \cdot \frac{d^2 y_{\Gamma}}{dt^2} - P_{K3} + m_{\Gamma} \cdot g &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $P_{кз} = c_2 \left( \ddot{y}_n - \ddot{y}_c - \ddot{y}_r \right) + k'_D \left( \dot{y}_n - \dot{y}_c - \dot{y}_r \right)$  – натяжение в канатах на третьем этапе движения.



**Рис. 1** – Трехмассовая эквивалентная схема механизма подъема автомобильного крана при подъеме груза с жесткого основания

Здесь  $m_n$  – приведенная к канатам масса вращающихся частей привода подъема груза, кг;  $m_c$  – приведенная масса стрелы крана, кг;  $m_r$  – масса груза, кг;  $c_c$  – коэффициент жесткости стрелы крана, Н/м;  $c_p$  – коэффициент жесткости стрелового каната, Н/м;  $c_k$  – коэффициент жесткости грузового каната на участке от барабана до полиспаста, Н/м;  $c_n$  – коэффициент жесткости грузового полиспаста, Н/м;  $k_D$  – коэффициент затухания колебаний (демпфирования) металлоконструкции, Н·с/м;  $k'_D$  – коэффициент затухания колебаний (демпфирования) канатов, Н·с/м;  $P_{dq}$  – приведенная к канатам сила двигателя, Н;  $y_n$ ,  $y_c$ ,  $y_r$  – пути, проходимые соответственно массами  $m_n$ ,  $m_c$ ,  $m_r$  от начала координат (М).

Расчет коэффициентов в дифференциальных уравнениях выполнен по правилам сопротивления материалов и прикладной механики [4].

### **Приведение уравнений движения к виду, удобному для численного интегрирования**

Для применения стандартных программ численного интегрирования системы дифференциальных уравнений второго порядка (1) и (2) преобразованы в системы дифференциальных уравнений первого порядка. Введены обозначения:

$$\begin{aligned} y_n &= Y_1; & \dot{y}_n &= Y_2; \\ y_m &= Y_3; & \dot{y}_m &= Y_4; \\ y_z &= Y_5; & \dot{y}_z &= Y_6. \end{aligned} \quad (3)$$

Тогда вместо системы дифференциальных уравнений движения второго порядка (1) и (2) получим системы уравнений первого порядка:

- второй этап движения:

$$\begin{cases} \dot{y}_n = Y_2; \\ \ddot{y}_n = \mathbf{P}_d - P_{k2} \rceil m_n; \\ \dot{y}_m = Y_4; \\ \ddot{y}_m = \mathbf{P}_{k2} - S_m \rceil m_m. \end{cases} \quad (4)$$

- третий этап движения:

$$\begin{cases} \dot{y}_n = Y_2; \\ \ddot{y}_n = \mathbf{P}_{dq} - P_{k3} \rceil m_n; \\ \dot{y}_m = Y_4; \\ \ddot{y}_m = \mathbf{P}_{k3} - P_m \rceil m_m; \\ \dot{y}_z = Y_6; \\ \ddot{y}_z = \mathbf{P}_{k3} - m_z \cdot g \rceil m_z. \end{cases} \quad (5)$$

Здесь

$$P_{к2} = c_{к} \cdot (\ddot{Y}_1 - Y_3) + k'_D \cdot (\dot{Y}_2 - Y_4) ; \quad (6)$$

$$P_{к3} = c_{к} \cdot (\ddot{Y}_1 - Y_3 - Y_5) + k'_D \cdot (\dot{Y}_2 - Y_4 - Y_6) ; \quad (7)$$

$$P_M = c_M \cdot Y_3 + k_D \cdot Y_4 ; \quad (8)$$

$$P_{\ddot{a}q} = \eta \cdot \frac{u_M}{r_a} \cdot M_k = \eta \cdot \frac{u_M}{r_a} \cdot (c \cdot \dot{y}_n^2 + b \cdot \dot{y}_n + c) ; \quad (9)$$

### Анализ процесса подъема груза с жесткого основания

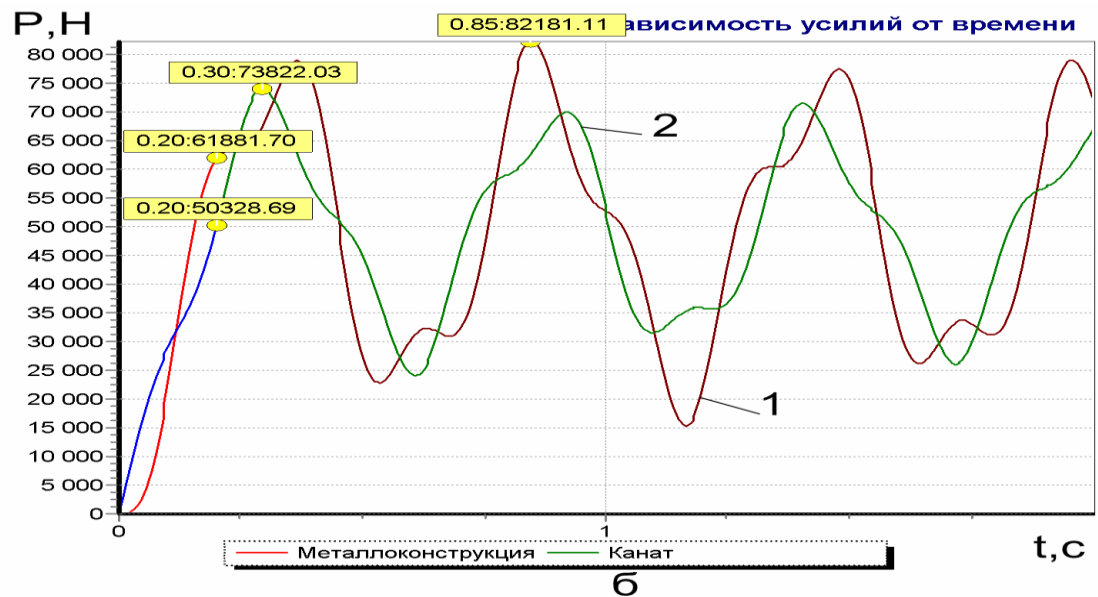
Для определения динамических нагрузок возникающих при подъеме груза введем значения коэффициентов дифференциальных уравнений (табл.1). Проведя численное интегрирование при помощи ЭВМ определим динамические нагрузки, возникающие при подъеме груза с жесткого основания автомобильным краном.

**Таблица 1**

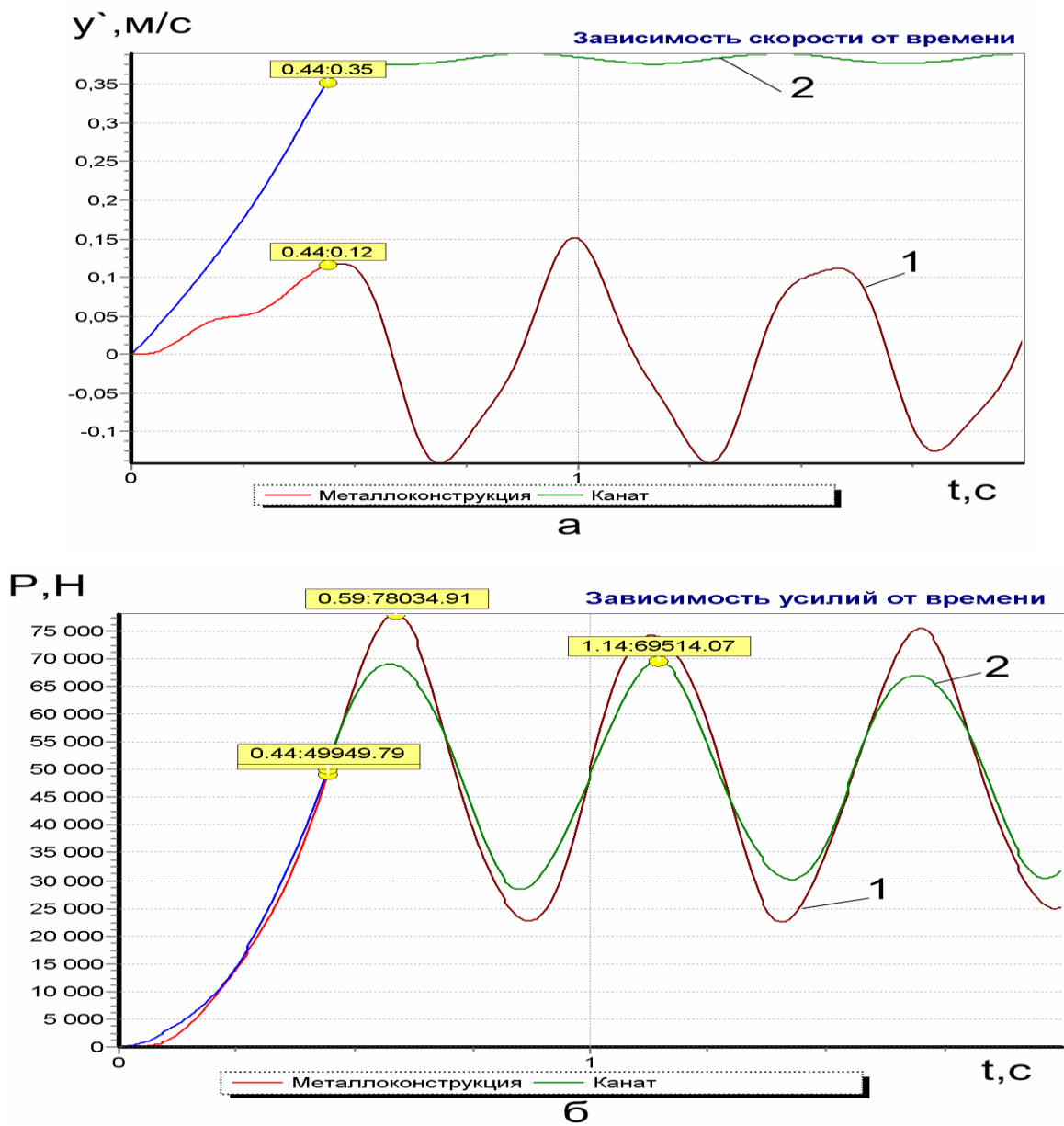
Значения коэффициентов дифференциальных уравнений

Номер передачи	$m_n$ , кг	$m_c$ , кг	$m_T$ , кг	$c_c$ , Н/см	$c_k$ , Н/см	$k_D$ , кН·с/м	$k'_D$ , кН·с/м	$V_n$ , м/с
1 передача	287700	617	5000	1985000	101300	10	25	0,05
2 передача	93930	617	5000	1985000	101300	10	25	0,35

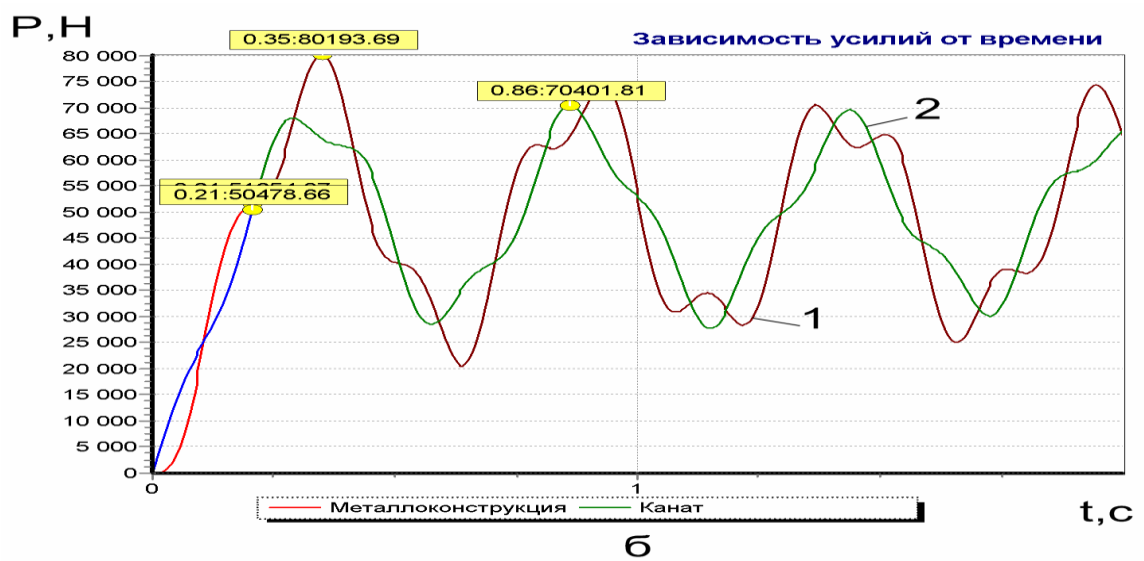
На рисунках 2 – 5 представлены графики изменения параметров переходного процесса подъема груза с жесткого основания. Рассмотрены случаи работы крана с начальной скоростью подъема груза  $v_n = 0,35$  м/с и  $v_n = 0,05$  м/с, что соответствует подъему груза на второй и первой ступени коробки скоростей.



**Рис.2** – Графики изменения скорости (а) и усилия (б) от времени при подъеме груза на второй ступени со скоростью подъема 0,35 м/с: 1 – металлоконструкция; 2 – канат.

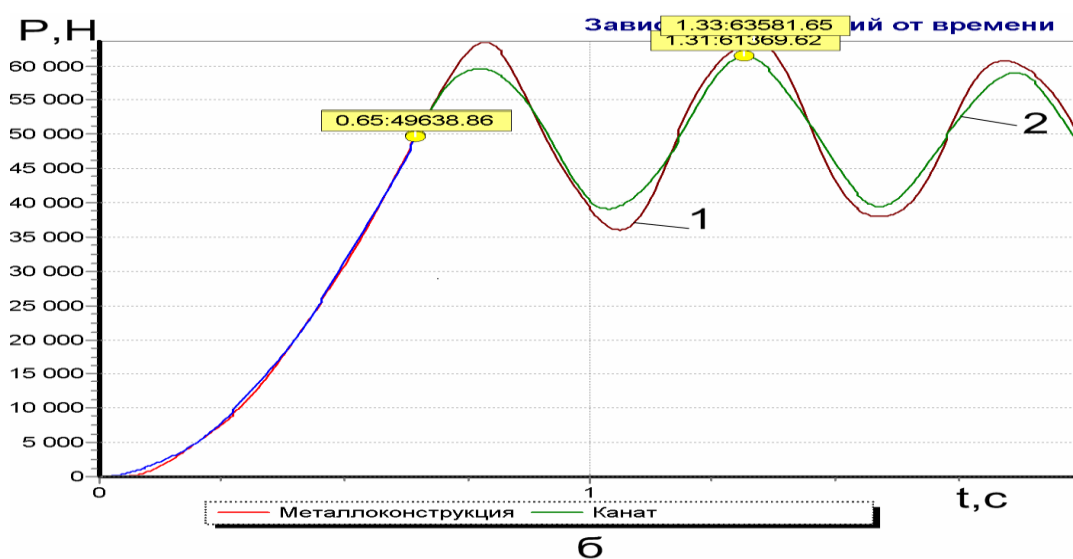
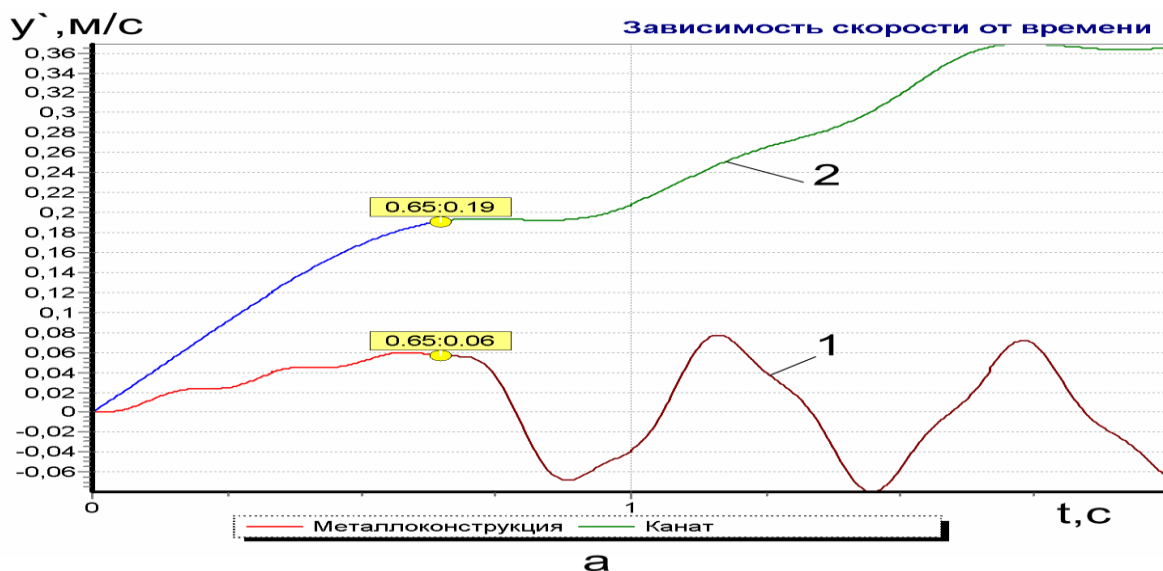


**Рис. 3** – Графики изменения скорости (а) и усилия (б) от времени при подъеме груза на второй ступени со скоростью подъема 0,05 м/с: 1 – металлоконструкция; 2 – канат.



**Рис.4** – Графики изменения скорости (а) и усилия (б) от времени при подъеме груза на первой ступени со скоростью подъема 0,35 м/с: 1 – металлоконструкция; 2 – канат.





**Рис.5** – Графики изменения скорости (а) и усилия (б) от времени при подъеме груза на первой ступени со скоростью подъема 0,05 м/с: 1 – металлоконструкция; 2 – канат.

Анализ представленных на рис. 2 - 5 графиков показывает, что при подъеме груза с начальной скоростью подъема  $V_n = 0,35$  м/с уже через 0,2с на второй ступени и 0,21с на первой ступени коробки передач после начала нагружения канатов усилие в них становится равным весу груза, т.е. происходит отрыв груза от основания. Усилие в канате и металлоконструкции резко увеличивается, достигая максимальных значений уже через 0,3 – 0.4 с. В случае подъема груза с  $V_n = 0,05$  м/с усилие в канатах

становится равным весу груза через 0,44 и 0,65с (на второй и первой ступени соответственно). Увеличение усилий и скоростей в этом случае происходит медленнее, чем в предыдущем случае, что отражается как на величине максимальных усилий, так и на характере их изменения. При подъеме груза с номинальной скоростью коэффициенты динамичности составляют: для грузовых канатов  $K_{дк} = 1,4$  и  $1,35$  для металлоконструкции  $K_{дс} = 1,6$  и  $1,5$  (на второй и первой ступени соответственно). Подъем груза с начальной скоростью  $V_n = 0,05$  м/с сопровождается значительно меньшими динамическими нагрузками. В этом случае коэффициент динамичности грузовых канатов  $K_{дк} = 1,3$  и  $1,22$ , а металлоконструкции  $K_{дс} = 1,56$  и  $1,27$  (на второй и первой ступени соответственно).

## **5. Выводы**

1. Одними из определяющих влияний на значения коэффициентов динамичности металлоконструкции являются механическая характеристика привода и скорость подъема в начале нагружения канатов.
2. Величина динамических нагрузок металлоконструкций зависит от номинальной скорости подъема.
3. Динамические усилия в металлоконструкции достигают максимальных значений уже через 0,3 – 0,4 с после начала нагружения канатов, поэтому учет демпфирования существенно не сказывается на этих усилиях.

## **Список использованных источников**

1. Будиков Л. Я. Многопараметрический анализ динамики грузоподъемных кранов мостового типа : монография / Л. Я. Будиков. – 2-е изд. – Луганск : Изд-во СНУ им. В. Даля, 2003. – 210 с.
2. Демідас С. В. Мінімізація динамічних навантажень в елементах баштового крана на основі оптимізації режиму руху механізма

підйому : дис. ... канд. техн. наук / С. В. Демідас. – К., 2000. – 193 с.

3. Солтус А. П. Теорія експлуатаційних властивостей автомобіля / А. П. Солтус. – К. : Арістей, 2006. – 175 с.
4. Тимошенко С. П. Сопротивление материалов: В 2-х т. Т. 2: Более сложные вопросы теории и задачи / С. П. Тимошенко ; пер. с 3-го амер. изд. В. Н. Федорова. – М. : Наука 1965. – 480 с.

***Подольак О.С.*** «Многофакторный анализ динамики подъема груза автомобильным краном»

В статье построены динамическая и математическая модели автомобильного крана при подъеме груза с жесткого основания, проведен анализ переходных процессов с помощью численного интегрирования уравнений движения.

***Подольак О.С.*** «Багатофакторний аналіз динаміки підйому вантажу автомобільним краном»

В статті побудовані динамічна та математична моделі автомобільного крана при підйомі вантажу з жорсткої основи, проведений аналіз перехідних процесів за допомогою чисельного інтегрування рівнянь руху.

***Podoliak O.S.*** «Multiple-factor analysis of dynamics of hoisting a load by a crane truck».

The dynamic and mathematical models of a crane truck hoisting of a load from the rigid base were built in the article, the analysis the transient processes at a help of numerical integration the motion equations.