

УДК 621.9

А.Г. Татьянченко, д-р техн. наук, проф.,
Донецкий национальный технический университет

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СТРЕЛОВЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ГОРНЫХ МАШИН КАК СИСТЕМ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Рассмотрены вопросы развития методов исследования напряженно-деформированного состояния стреловых вантовых металлоконструкций горных машин для открытых горных работ за счет использования современных методов расчета систем с распределенными параметрами. Показана необходимость учета собственного веса подобных конструкций при оценке их динамических характеристик.

стреловые металлоконструкции, вантовые системы, гибкие элементы, системы с распределенными параметрами, динамическая модель, собственные колебания, вынужденные колебания

Проблема и ее связь с научными или практическими исследованиями. Характерной особенностью конструкций отечественных отвалообразователей (ОШ-1900, ОШ-4500/90, ОШР-4500/180 и др.) является то, что в отличие от большинства аналогичных моделей, выпускаемых за рубежом (Германия, Чехия), они имеют вантовую систему стреловых металлоконструкций [1]. Такие системы содержат стержневые элементы, работающие как на растяжение, так и на сжатие, и гибкие элементы (ванты), работающие только на растяжение, и более рационально по сравнению со стержневыми системами загружены при работе. Поэтому отечественные отвалообразователи имеют существенное (до 5-7 раз) преимущество в металлоемкости по сравнению с зарубежными аналогами. Однако облегченные вантовые конструкции требуют тщательной оценки их напряженно-деформированного состояния и надежности с учетом конструктивных и технологических особенностей. При этом наибольшую опасность для работы таких систем представляют динамические технологические нагрузки.

Анализ исследований и публикаций. Существующий в настоящее время подход к оценке напряженно-деформированного состояния стреловых металлоконструкций отвалообразователей (отвальной стрелы и приемной консоли) при динамических внешних воздействиях [2, 3] как невесомых многомассовых систем не учитывает колебания стержневых и вантовых элементов системы, вызванные влиянием

их собственного веса. В то же время современные методы строительной механики [4], позволяют исследовать динамические процессы в одноосных элементах, как системах с распределенными параметрами, то есть весомых системах. Реализация таких систем возможна на основе метода перемещений, метода сил или метода начальных параметров.

Постановка задачи. Поэтому в настоящей работе поставлена задача адаптации современных методов расчета систем с распределенными параметрами для создания математических моделей вантовых систем на основе конструкции отвальной стрелы отвалообразователя ОШ-1900.

Изложение материала и результаты. Для определения динамических характеристик стреловых вантовых конструкций была разработана математическая модель отвальной стрелы отвалообразователя ОШ-1900 с шагающим механизмом передвижения производства ПО «Гормаш» как системы с распределенными параметрами, которая была реализована на основе теории метода перемещений [4]. Отвальная стрела ОШ-1900 представляет собой сложную пространственную конструкцию с независимыми вантовыми системами в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Анализ работы отвалообразователя показал, что наибольшую опасность представляет динамическое нагружение отвальной стрелы в вертикальной плоскости (рис.1), возникающее не только в процессе технологического нагружения, но при работе механизма шагания.

Несущая конструкция отвальной стрелы ОШ-1900 представляет собой трубчатый стержень длиной 105м и диаметром $d=820$ мм с переменной толщиной стенок, подвешенный к опорному пилону при помощи четырех канатов диаметром до 54 мм. На несущую конструкцию крепится различное технологическое оборудование и ленточный конвейер для транспортировки породы. На расчетной динамической схеме отвальную стрелу можно представить в виде комбинированной системы, состоящих из изгибных весомых элементов погонной массой m_i (учитывает погонный вес трубчатого стержня и конвейера), подвешенный при помощи весомых гибких нитей погонной массой m_{ki} (учитывает погонный вес канатов). Вес горизонтальной вантовой системы и различного технологического оборудования учитывается сосредоточенными массами M_i . Такая расчетная схема является три раза статически неопределимой или восемь раз кинематически неопределимой.

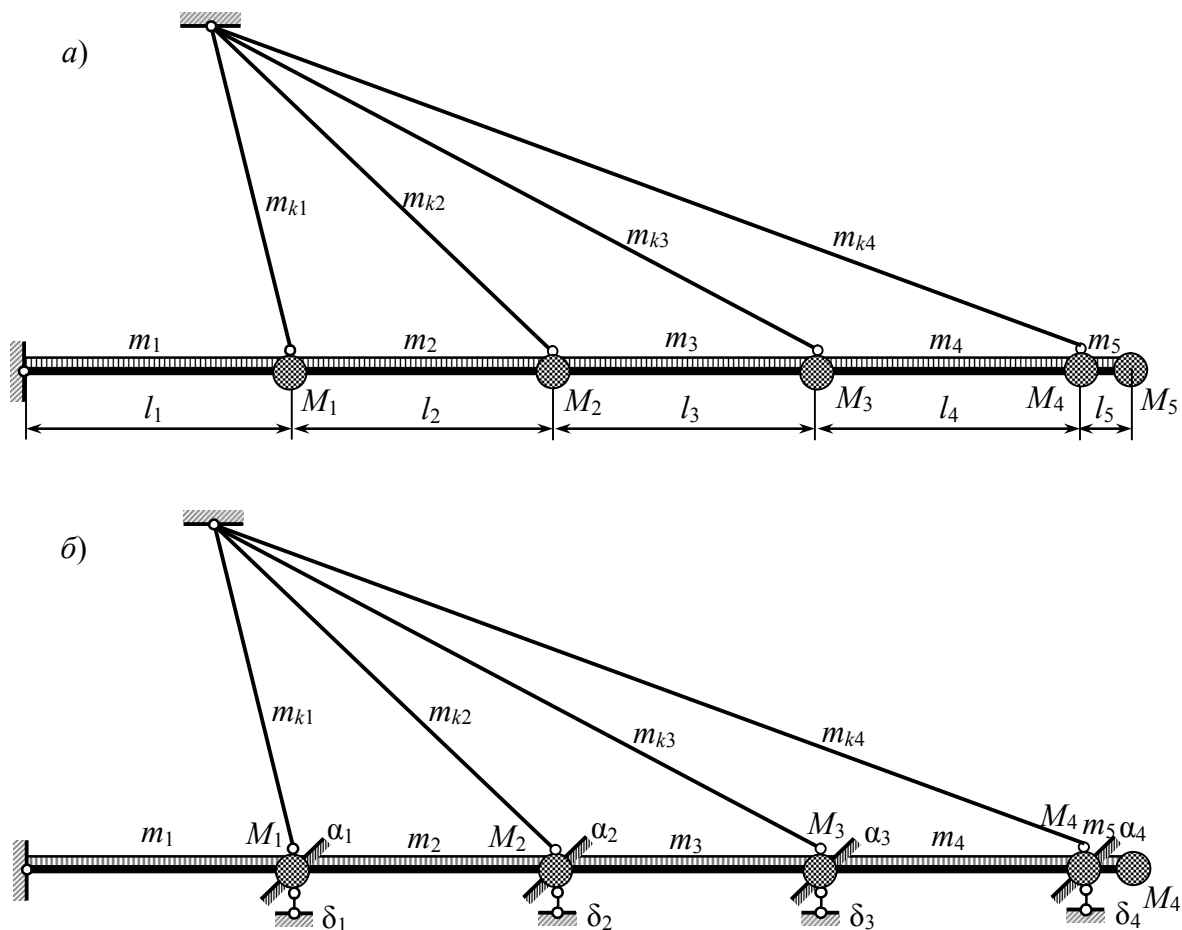


Рисунок 1 - Отвальная стрела ОШ-1900 как система с распределенными параметрами: а) расчетная схема, б) основная и эквивалентная системы

С учетом характера внешнего воздействия, динамические характеристики отвальной стрелы удобней всего определять на основе системы канонических уравнений метода перемещений

$$\mathbf{R} \cdot \mathbf{Z} + \mathbf{R}_p = 0, \tag{1}$$

где $\mathbf{Z} = \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4\}$ – матрица-столбец угловых α_i и линейных δ_i перемещений, \mathbf{R} – матрица единичных коэффициентов системы канонических уравнений метода перемещений

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & \cdots & m_{18} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ m_{41} & m_{42} & \cdots & m_{48} \\ r_{51} & r_{52} & \cdots & r_{58} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{81} & r_{82} & \cdots & r_{88} \end{pmatrix},$$

m_{ik} – изгибающий момент в i -й связи (заделке) от единичного смещения k -й связи, r_{ik} – реакция в i -й связи (опоре) от единичного смещения k -й связи,

$\mathbf{R}_p = \{M_{1p}, M_{2p}, M_{3p}, M_{4p}, R_{5p}, R_{6p}, R_{7p}, R_{8p}\}$ – матрица-столбец грузовых коэффициентов системы канонических уравнений метода перемещений, M_{ip} – изгибающий момент в i -й связи (заделке) от смещения k -й связи при внешнем воздействии, R_{5p} – реакция в i -й связи (опоре) от смещения k -й связи при внешнем воздействии.

При формировании единичных и грузовых коэффициентов учитывались :

- колебания трубчатого несущего стержня;
- колебания канатов вертикальной подвески;
- колебания сосредоточенных узловых масс.

Колебания трубчатого стержня учитывались на основе решений для простых балок (опорных реакций и моментов при смещениях и поворотах опорных точек), полученных из уравнения изогнутой оси балки при колебаниях с учетом и без учета продольной силы. Поскольку несущий трубчатый стержень отвальной стрелы испытывает значительные (до 2400 кН) продольные усилия, при формировании математической модели были проведены дополнительные исследования влияния продольной силы на динамические характеристики и разработаны методы ее учета. Для учета влияния продольной силы на основе дифференциального уравнения поперечных колебаний вешного стержня (рис. 2)

$$m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - T \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + EJ \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} = 0,$$

автором было получено уравнение изогнутой оси балки при колебаниях в форме начальных параметров [5]

$$u(x) = u_0 A_{kx} + \Theta_0 \frac{B_{kx}^*}{k} + M_0 \frac{C_{kx}}{k^2 EJ} + Q_0 \frac{D_{kx}}{k^2 EJ},$$

и его производные

$$\Theta(x) = \frac{du(x)}{dx} = k u_0 A_{kx} + \Theta_0 B_{kx}^* + M_0 \frac{C_{kx}^*}{k EJ} + Q_0 \frac{D_{kx}}{k^2 EJ},$$

$$M(x) = EJ \frac{d^2 u(x)}{dx^2} = k^2 EJ u_0 C_{kx} + k EJ \Theta_0 D_{kx} + M_0 A_{kx}^* + Q_0 \frac{D_{kx}}{k^2 EJ},$$

$$Q(x) = EJ \frac{d^3 u(x)}{dx^2} = k^3 EJ u_0 B_{kx} + kEJ \Theta_0 C_{kx} + kM_0 D_{kx}^* + Q_0 A_{kx}^*.$$

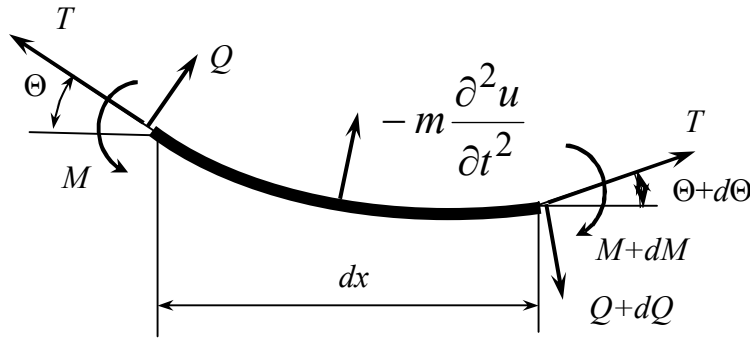


Рисунок 2 - Поперечные колебания весомой балки

Тригонометрические функции

$$A_{kx} = \frac{\bar{k}^2 \operatorname{ch} Kx + K^2 \cos \bar{k}x}{K^2 + \bar{k}^2}, \quad B_{kx} = k \frac{K \operatorname{sh} Kx + \bar{k} \sin \bar{k}x}{K^2 + \bar{k}^2},$$

$$C_{kx} = k^2 \frac{\operatorname{ch} Kx - \cos \bar{k}x}{K^2 + \bar{k}^2}, \quad D_{kx} = k \frac{\bar{k} \operatorname{sh} Kx + K \sin \bar{k}x}{K^2 + \bar{k}^2},$$

$$A_{kx}^* = \frac{K^2 \operatorname{ch} Kx + \bar{k}^2 \cos \bar{k}x}{K^2 + \bar{k}^2}, \quad B_{kx}^* = \frac{\bar{k}^3 \operatorname{sh} Kx + K^3 \sin \bar{k}x}{k(K^2 + \bar{k}^2)},$$

$$D_{kx}^* = \frac{K^3 \operatorname{sh} Kx + \bar{k}^3 \sin \bar{k}x}{k(K^2 + \bar{k}^2)},$$

где $k = 4 \sqrt{\frac{m\omega^2}{EJ}}$, $\bar{k} = \sqrt{\frac{\sqrt{T^2 + 4EJm\omega^2} - T}{2EJ}}$, $K = \sqrt{\frac{\sqrt{T^2 + 4EJm\omega^2} + T}{2EJ}}$,

в этих уравнениях, в отличие от известных функций А.Н.Крылова [4], учитывают влияние продольной силы T и также как и функции А.Н.Крылова обладают свойствами кругового интегрирования и дифференцирования.

Для учета колебаний весомых канатов использовались решения волнового уравнения $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$, где $c^2 = \frac{T}{m_k}$ при поперечных и

$c^2 = \frac{EF}{m_k}$ при продольных колебаниях весомого стержня с погонной массой m_k . Суммарные опорные реакции в дополнительных опорах от колебаний канатов определялись как $R = N \sin \varphi + S \cos \varphi$, где в виде

N – реакция от продольных колебаний, S – реакция от поперечных колебаний, φ – угол наклона каната. Составляющие опорных реакций от колебаний узловых сосредоточенных масс учитывались как силы инерции.

Разработанная на основе уравнения (1) математическая модель динамических процессов в вантовой системе отвальной стрелы отваллообразователя была реализована на ЭВМ в параметрической форме с возможностью варьирования различных входных геометрических параметров, свойств материалов и внешних нагрузок. На основе этой модели были исследованы собственные частоты отвальной стрелы. Спектр частот ω_i приведен в таблице 1 (колонка 1). Первая, наиболее опасная, частота собственных колебаний базовой конструкции отвальной стрелы составила $5,46\text{c}^{-1}$.

Таблица 1. Собственные частоты отвальной стрелы ОШ-1900

№	ω_i, c^{-1}		
	1	2	3
1	5,46	12,58	3,61
2	25,05	13,17	7,72
3	25,60	18,40	282,91
4	32,09	20,34	632,82
5	34,95	22,89	647,65

При варьировании различными параметрами математической модели оказалось, что пренебрежение в расчетной схеме продольными сжимающими усилиями приводит к увеличению расчетного значения первой собственной частоты до $12,58\text{c}^{-1}$. Спектр частот ω_i для схемы без учета продольной силы приведен в колонке 2 табл. 1. Замена распределенных параметров сосредоточенными массами приводит к снижению расчетного значения первой собственной частоты до $3,61\text{c}^{-1}$. Спектр частот ω_i для многомассовой невесомой системы приведен в колонке 3 табл. 1.

Адекватность разработанной математической модели вантовой системы отвальной стрелы была подтверждена в ходе полевых испытаний на отвалообразователе ОШ-1900/110/150 ПО «Беларускалий» (г. Солигорск). При экспериментальных замерах собственных частот первая частота составила $4,96\text{c}^{-1}$. Расчетное значение первой собственной частоты отвальной стрелы для данной модификации ОШ-1900 составило $5,21 \text{c}^{-1}$.

Выводы и направление дальнейших исследований. Проведенные исследования динамических характеристик отвальной стрелы ОШ-1900 на основе математической модели с распределенными параметрами показали необходимость позволили сделать следующие выводы:

– расчет вантовых конструкций на основе математических моделей невесомых многомассовых систем приводит к значительному (до 34%) занижению расчетных динамических характеристик;

– наиболее существенное влияние на точность определения динамических характеристик отвальной стрелы оказывают продольные усилия в стержневых элементах пренебрежение которыми приводит к значительному завышению расчетных динамических характеристик;

– предложенный метод определения динамических характеристик вантовых конструкций как систем с распределенными параметрами, учитывающий колебания весомих стержневых и гибких элементов и продольные усилия в стержневых элементах, может быть использован при определении динамических характеристик любых вантовых и стержневых конструкций и в перспективе может быть распространен на исследование вынужденных колебаний.

Список литературы

1. Серый В.П. Отвалообразователи и перегружатели в СССР и за рубежом / В.П.Серый, В.Я.Барабанов, Н.П.Дорошенко. - М.: ЦНИЭИуголь, 1987. – 60 с.
2. Волков Д.П. Динамика и прочность многоковшовых экскаваторов и отвалообразователей / Д.П.Волков, В.А.Черкасов. – М.: Машиностроение, 1969. – 408 с.
3. Панкратов С.А. Динамика машин для открытых горных и земляных работ / С.А. Панкратов. – М.: Машиностроение, 1967. – 448 с.
4. Киселев В.А. Строительная механика. Специальный курс / В.А. Киселев. – М.: Стройиздат, 1980. – 616 с.
5. Шевченко Ф.Л. К расчету на прочность отвальной стрелы отвалообразователя в режиме шагания / Ф.Л.Шевченко, А.Г.Татьянченко // Изв. Вузов. Строительство и архитектура. – 1990. - № 3. – С.92-95.

О.Г. Татьянченко. Удосконалення динамічної моделі стрілових металоконструкцій гірничих машин як систем с розподіленими параметрами. Розглянуті питання розвитку методів дослідження напружено-деформованого стану стрілових вантових металоконструкцій гірничих машин для відкритих гірничих робіт за рахунок використання сучасних методів розрахунку систем с розподіленими параметрами. Показана необхідність урахування власної ваги подібних конструкцій при оцінюванні їх динамічних характеристик.

стрілові металоконструкції, вантові системи, гнучкі елементи, системи з розподіленими параметрами, динамічна модель, власні коливання, вимушені коливання

A.G. Tatyanchenko. Improving the Dynamic Model of the Arrow Metal Construction of Mining Machines as a Distributed Parameters System. *The paper considers the methods of studying the stress-deformed state of arrow cable-stayed systems of mining machines through the use of modern methods of calculating distributed parameters systems. The necessity of taking into account the weight of such structures in the evaluation of their dynamic characteristics is confirmed.*

arrow metal construction, cable-stayed system, flexible components, distributed parameters system, dynamic model, natural oscillations, forced oscillations

Стаття надійшла до редколегії 29.09.2010

Рецензент: зав. каф. теоретичної механіки ДонНТУ, д-р техн. наук, проф. Ф.Л. Шевченко

© Татяанченко А.Г., 2010