

УДК 621.878

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРЕЛЫ АВТОБЕТОНОНАСОСА

Доценко Анатолий Иванович, д-р техн. наук, проф.,  
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, [dormash@madi.ru](mailto:dormash@madi.ru)

Улитич Ольга Юрьевна, канд. техн. наук, доц.,  
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, [ulitoch@mail.ru](mailto:ulitoch@mail.ru)

Вагабов Абдурагим Фиридинович, магистрант,  
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, [abduragim.vagabov@mail.ru](mailto:abduragim.vagabov@mail.ru)

**Аннотация.** Автобетононасос является наиболее эффективным инструментом для работы с бетонными смесями при строительстве высотных сооружений. С развитием строительной техники к стреле автобетононасоса предъявляются все более высокие технические требования по динамике и управлению. С целью изучения динамических характеристик стреловой системы в этой работе были построены три динамические модели, такие как модель с несколькими жесткими звеньями, модель жестко-гибкой муфты и жестко-гибкая модель сцепления с гидравлическим цилиндром. Был проведен имитационный анализ и экспериментальный анализ, и они показывают, что необходимо не только учитывать движение большой дальности, но и учитывать малую гибкую деформацию для точного изучения динамических характеристик системы стрелы. Он обеспечивает теоретическую основу для управления вибрацией, прогнозирования траектории и оценки срока службы для системы стрелы и подобных конструкций.

**Ключевые слова:** автобетононасос, стреловая система, динамика и управление.

## STUDY OF DYNAMIC CHARACTERISTICS CONCRETE PUMP BOOM

Dotsenko Anatoliy I., Dr. Sc., professor,  
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, [dormash@madi.ru](mailto:dormash@madi.ru)

Ulitch Ol'ga Y., Ph.D., associate professor,  
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, [ulitoch@mail.ru](mailto:ulitoch@mail.ru)

Vagabov Abduragim F., undergraduate,  
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, [abduragim.vagabov@mail.ru](mailto:abduragim.vagabov@mail.ru)

**Abstract.** The truck mounted concrete pump is the most efficient tool for working with concrete mixtures in the construction of high-rise structures. With the development of construction technology, ever higher technical requirements are placed on the boom of a concrete pump in terms of dynamics and control. In order to study the dynamic characteristics of the boom system, three dynamic models were built in this work, such as a model with several rigid links, a rigid-flex coupling model, and a rigid-flex coupling model with an equivalent hydraulic cylinder. Simulation analysis and experimental analysis have been carried out, and they show that we must not only take into account long-range movement, but also take into account small flexible deformation in order to accurately study the dynamic characteristics of the boom system. It provides a theoretical framework for vibration control, trajectory prediction, and lifetime estimation for the boom system and such structures.

**Key words:** concrete pump, boom system, dynamics and control.

### Введение

Автобетононасос подает бетонную смесь в горизонтальном и вертикальном направлениях в зону укладки с помощью распределительной стрелы-манипулятора с бетоноводом.

Стрела – это ключевая часть автобетононасоса, и ее работа заключается в транспортировке бетона к месту заливки. Она состоит из шарнирно-сочлененных секций коробчатого сечения, движение которым в вертикальной плоскости сообщается гидроцилиндрами [1]. В последнее время стрелы становятся длиннее. Ее длина в некоторых моделях превышает 60 м.

Таким образом динамика и управление стрелой усложняется.

Многие исследователи изучали динамические характеристики стреловой системы. В ранних исследованиях стреловая система рассматривается как система с несколькими твердыми телами.

Динамическая модель стреловой системы и динамические характеристики были проанализированы с использованием теории динамики.

В этих исследованиях не учитывалось влияние на динамические характеристики гибкой деформации.

На самом деле стрела не является большим твердым телом, ей свойственно еще и небольшая гибкая деформация.

С увеличением длины стреловой системы, влияние гибкой деформации становится все более существенным.

### **Анализ предыдущих работ**

В последнее время некоторые исследователи изучили динамические характеристики системы стрелы, используя динамическую теорию жестко-гибкой связи. В динамике жестко-гибкой связи изучается динамическое поведение тел, состоящих из твердых и гибких тел.

Лагерев А.В. провел структурный анализ существующих гидравлических крано-манипуляторных установок, установленных на шасси отечественных и зарубежных мобильных транспортно-технологических машин различного назначения, конструктивного исполнения и технических характеристик. Он показал, что в большинстве случаев в конструкциях секций стрел и поворотных колонн используются тонкостенные стержни с замкнутым профилем. Для оценки нагруженности данных элементов металлоконструкции в монографии были представлены универсальные прочностные модели и методики определения напряжений и внутренних силовых факторов, основанная на положениях теории тонкостенных стержней [2].

Baraff D. создал динамическую модель системы стрелы и выполнил численные вычисления с использованием теории жестко-гибкой динамики нескольких тел [3].

Мильто А.А. наглядно продемонстрировал модели и динамические характеристики боновых заграждений, используя различные среды разработки программного обеспечения и анализа методом конечных элементов [4].

Несмотря на то, что дифференциальное уравнение жесткого движения стрел выводится теорией динамики нескольких тел и

уравнением Лагранжа, гибкая модель является более точной и сложной, так как деформация происходит в процессе заливки.

Широкое распространение получила специальная форма записи математических выражений кинематики и динамики – spatial vector algebra. В ней используются шестимерные векторы для описания скоростей, ускорений, сил и моментов. [2]

В вышеуказанных исследованиях ученые не установили эквивалентную модель гидроцилиндра, но гидроцилиндр соединен непосредственно между двумя секциями рычага как жесткая модель. Это приводит нас к неточному пониманию динамических характеристик стреловой системы.

### **Основная часть**

В данной статье представлено исследование динамических характеристик жестко-гибкой муфты стреловой системы в автобетононасосе. Были построены три динамические модели.

Первая – это модель с несколькими жесткими кузовами.

Вторая – жестко-гибкая модель связи, построенная с использованием модального редуцированного метода.

Последняя представляет собой жестко-гибкую модель сцепления с эквивалентным гидравлическим цилиндром с использованием виртуального пружинно-демпферного метода.

Исследование даст теоретическую основу для управления вибрацией, прогнозирования траектории и оценки срока службы для системы стрелы и таких конструкций.

### **Модальный редуцированный метод**

Модальный редуцированный метод основан на теории динамики нескольких тел конечных элементов. Его основная идея состоит в том, что модал гибкого тела вычисляется методом конечных элементов. Затем

динамическое напряжение, деформация гибкого тела могут быть получены с помощью модальной суперпозиции.

Изображенные на рисунке 1 трехмерные координаты любой точки  $i$  на гибком корпусе можно описать выражением (1):

$$\bar{r}_i = \bar{r} + A\bar{S}_i n = \bar{r} + A(\bar{S}_i^0 n + \bar{u}_i n) \quad (1)$$

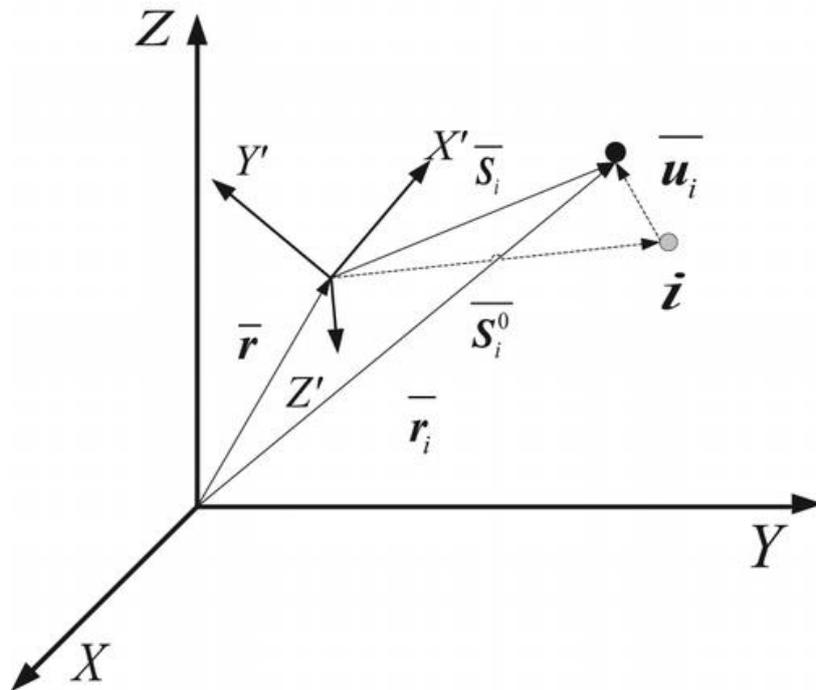


Рис. 1. Гибкая система координат

В уравнении (1):  $A$  – матрица передачи,  $\bar{S}_i^0$  – противоположный вектор деформации,  $\bar{u}_i$  – вектор деформации.

Модальная матрица перемещения и вращения точки  $i$  есть:

$$\psi^i = [\psi_t^{iT}, \psi_r^{iT}] \quad (2)$$

Модальные координаты относительной деформации  $\bar{u}_i$  выражаются как:

$$\dot{u}_i = \psi_t^i \bar{a} \quad (3)$$

В уравнении (3)  $\bar{a}$  – вектор модального положения.

Применив уравнение (3) к уравнению (1), мы можем получить:

$$\bar{r}_i = \bar{r} + A(\bar{S}_i^0 n + \psi_i^i \bar{a}) \quad (4)$$

Согласно модальной информации, могут быть получены уравнения скорости и уравнения ускорения любой точки на гибком теле. Общее смещение гибкого корпуса выглядит следующим образом:

$$[u] = \sum a_i [\phi]_i \quad (5)$$

В уравнении (5)  $[u]$  – сумма вектора смещения каждого узла,  $a_i$  – является модальным фактором участия и  $[\phi]_i$  – режим структуры.

### Виртуальный пружинно-демпферный метод

Виртуальный пружинно-демпферный метод заключается в том, что некоторая структура в механической системе эквивалентна пружине, которая имеет определенную структурную жесткость и демпфирование. Система стрелы автобетононасоса приводится в движение и управляется гидравлическим цилиндром. В этой статье мы рассматриваем гидроцилиндр как модель с определенной жесткостью и демпфированием.

На рисунке 2 показана эквивалентная модель гидравлического цилиндра.

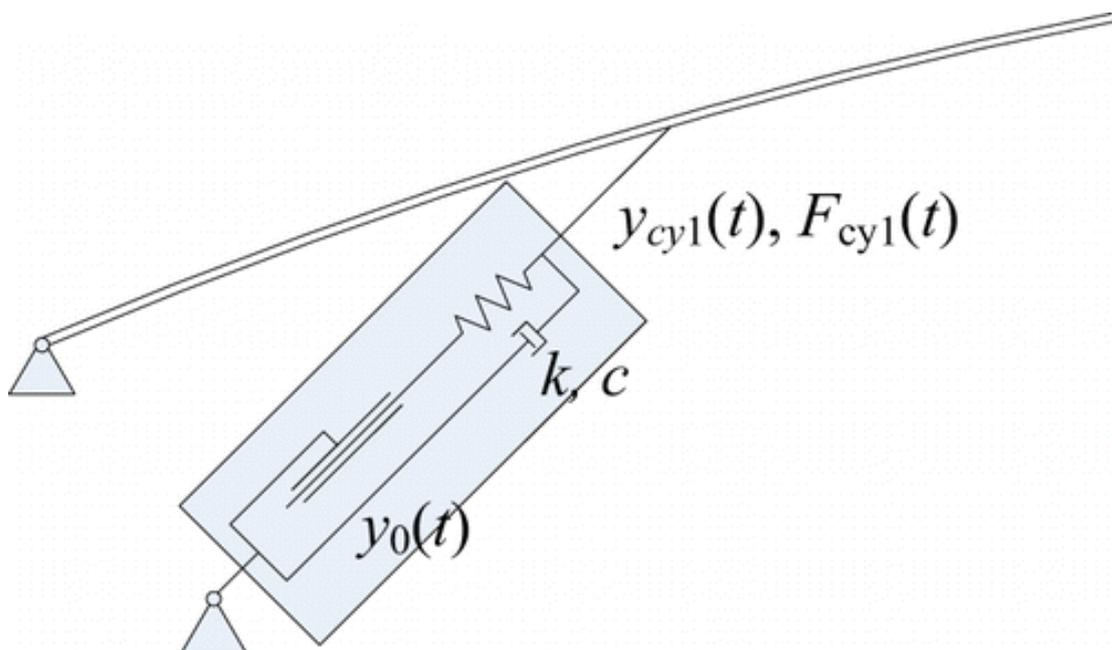


Рис. 2. Эквивалентная модель гидроцилиндра

Сила  $F_{cy1}$  и перемещение  $y$  гидравлического цилиндра, показанного на рисунке 2, можно записать как:

$$F_{cy1} = k * (y_0(t) - y_{cy1}(t)) + c * (y_0(t) - y_{cy1}(t)) \quad (6)$$

$$y = \int_{t_0}^t -\frac{F_{cy1} - k(y_0(t) - y_{cy1}(t))}{c} dt \quad (7)$$

В уравнениях (6) и (7):  $y_0(t)$  – начальное положение гидроцилиндра,  $y_{cy1}(t)$  – конечное положение гидроцилиндра,  $k$  – эквивалентная жесткость гидравлического цилиндра,  $c$  – является эквивалентным демпфированием гидравлического цилиндра.

### Динамическая модель системы стрелы

При моделировании и имитации системы стрелы необходимо учитывать:

1. Только преобразования в плоскости и игнорировать влияние пространственного крутящего момента. Звено стрелы упростили как балку Эйлера-Бернулли.
2. Шарнирное соединение, поступательное соединение и фиксирующее соединение используются для соединения стрел со звеньями и петлями. Поступательное соединение используется для имитации движения гидравлического цилиндра.
3. Скорость стрелы системы не слишком высока, чтобы игнорировать влияние центробежного ускорения и ускорения Кориолиса.

На основе приведенных выше предположений, относящихся к фактической структуре стреловой системы автобетононасоса, для проведения сравнительного анализа были построены три типа динамических моделей, показанных в таблице 1.

Динамические модели стрелы

Модель	Три модели
1	Модель с несколькими жесткими звеньями
2	Модель жестко-гибкой муфты
3	Модель жестко-гибкой муфты с гидроцилиндром

Конструкция модели жестко-гибкой связи показана рисунке 3, на котором видно, что четыре секции рассматриваются как гибкие модели. Звенья, подшипники и гидравлические цилиндры считаются жесткими моделями.

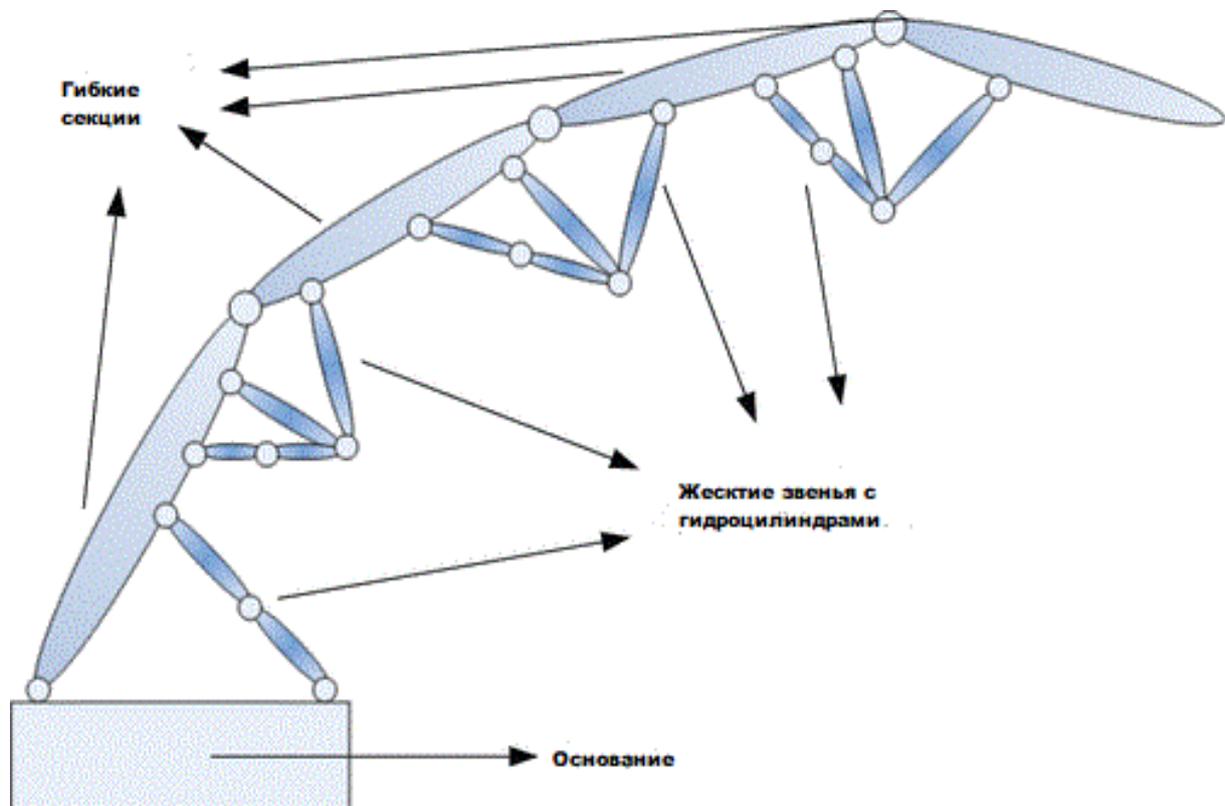


Рис. 3. Конструкция модели жестко-гибкой связи

### Выводы

В этой статье были исследованы три динамические модели стреловой системы автобетононасоса. Сначала была построена модель с несколькими жесткими кузовами. Затем для построения модели жестко-гибкой муфты применяется метод модальной редукции. Наконец, метод виртуальной пружины-демпфера описывает систему «пружина-демпфер» как эквивалент гидроцилиндра.

Анализ моделирования показывает, что необходимо учитывать не только движение стрелы в большом диапазоне, но и малую гибкую деформацию, если мы хотим точно изучить динамические характеристики системы стрелы. Кроме того, необходимо, чтобы гидроцилиндр был эквивалентен гибкой модели.

В методе виртуальной пружины-демпфера эквивалентный коэффициент жесткости и эквивалентный коэффициент демпфирования очень важны для построения модели и должны быть точно рассчитаны в исследовании.

Это исследование обеспечивает теоретическую основу для контроля вибрации, прогнозирования траектории и оценки срока службы стреловой системы и подобных конструкций.

### Список литературы

1. Доценко, А.И. Строительные машины: учебник для строительных вузов / А.И. Доценко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ИНФРА-М, 2019. – 400 с.
2. Лагереv, А.В. Динамико-прочностной анализ гидравлических крано-манипуляторных установок мобильных машин: монография / А.В. Лагереv, А.А. Мильто, И.А. Лагереv. – Брянск: Издательство БГУ, 2015. – 186 с
3. Baraff, D. Linear-Time Dynamics using Lagrange Multipliers / D. Baraff \ SIGGRAPH '96 Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. – New Orleans, 1996. – August 4–9. – P. 137–146
4. Мильто, А.А. Реализация методик оценки динамики и прочности крано-манипуляторных установок мобильных транспортно-технологических машин в

вычислительном программном комплексе / А.А. Мильто // Материалы XVIII Московской междунар. научн.-техн. конф. «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы». – М.: МАДИ, 2014. – Ч. 1. – С. 71–72.

5. Мильто, А.А. Учет силового воздействия гидроцилиндров на конструкцию крано-манипуляторной установки многоцелевой мобильной машины в задачах динамики и прочности / А.А. Мильто // VII Всеросс. конф. молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.

### References

1. Docenko A.I. *Stroitel'nye mashiny* (Construction machines), Moscow, INFRA-M, 2019, 400 p.

2. Lagerev A.V., Mil'to A.A., Lagerev I.A., *Dinamiko-prochnostnoj analiz gidravlicheskih kранo-manipulyatornyh ustanovok mobil'nyh mashin* (Dynamic-strength analysis of hydraulic crane-manipulator installations of mobile machines), Bryansk, Izdatel'stvo BГУ, 2015, 186 p.

3. Baraff D. Linear-Time Dynamics using Lagrange Multipliers , SIGGRAPH '96 Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, New Orleans, 1996, August, 4–9, pp. 137–146

4. Mil'to A.A. *Materialy XVIII Moskovskoj mezhdunar. nauchn.-tekhn. konf. «Pod'emno-transportnye, stroitel'nye, dorozhnye, putevye mashiny i robototekhnicheskie komplekсы»*, Moscow, MADI, 2014, Part 1, pp. 71–72.

5. Mil'to A.A. *VII Vseross. konf. molodyh uchenyh i specialistov «Budushchee mashinostroeniya Rossii»*, Moscow, MGTU im. N.E. Bauman, 2014.

Рецензент: А.Г. Савельев, д-р техн. наук, проф., МАДИ