

## ПОБУДОВА ФІЗИЧНОЇ МОДЕЛІ ШАРНІРНО-ЗЧЛЕНОВАНОЇ СТРІЛОВОЇ СИСТЕМИ БАШТОВОГО КРАНА

Вячеслав Ловейкін, Олександр Шевчук

Національний університет біоресурсів і природокористування України  
вул. Героїв Оборони, 11, Київ, Україна, 03041 e-mail: oshev4uk@gmail.com

### CONSTRUCTION THE PHYSICAL MODEL OF THE ARTICULATED JIB OF TOWER CRANE

Vyacheslav Loveykin, Oleksandr Shevchuk

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Heroyiv Oborony Str., 11, Kyiv, Ukraine, 0304

**АННОТАЦІЯ.** У роботі, на основі теорії подібності технічних систем, визначено параметри фізичної моделі шарнірно-зчленованої стрілової системи баштового крана, за цими параметрами побудована фізична модель шарнірно-зчленованої стрілової системи для проведення експериментальних досліджень зміни вильоту баштового крана за рахунок переміщень шарнірно-зчленованої стрілової системи та вантажного візка. Наведено порівняння відповідних параметрів фізичної моделі та натурної машини.

**Ключові слова:** фізичне моделювання, критерій подібності, баштовий кран.

**АННОТАЦИЯ.** В работе, на основе теории подобия технических систем, определены параметры физической модели шарнирно - сочлененной стреловой системы башенного крана, по этим параметрам построена физическая модель шарнирно-сочлененной стреловой системы для проведения экспериментальных исследований изменения вылета башенного крана за счет перемещений шарнирно-сочлененной стреловой системы и грузовой тележки. Приведено сравнение соответствующих параметров физической модели и натурной машины.

**Ключевые слова:** физическое моделирование, критерий подобия, башенный кран.

**ABSTRACT. Purpose.** In this paper, based on the theory of similarity technical systems, have been obtained the parameters of the physical model of the articulated jib of tower crane, and also provides a comparison of relevant parameters of the model and full-scale machine. This paper deals with the problem of physical modelling of the articulated jib of tower crane. **Purpose.** The purpose is to determine the main parameters of the physical model which represent a luffing phenomenon. **Methodology/approach.** Based on the Lagrange equation coupled with theory of similarity technical systems have been composed differential equations that describe the luffing phenomenon and obtained the main parameters of the physical model. **Findings.** The main parameters of the physical model used to construction the real scaled model of the articulated jib of tower crane. **Research limitations/implications.** Based on the principles of physical modeling identifies the main parameters of the physical model of the articulated jib of a tower crane. **Originality/value.** This paper analyses executed for further researches and optimization of mode of motion in order to reducing of dynamic loads and reduction pendulum motion of the payload.

**Key words:** physical modeling, similarity criterion, tower crane.

Подано 04.03.2014; прийнято 30.04.2014

### ВСТУП

В експериментальних дослідженнях широко застосовується фізичне моделювання. Фізичне моделювання зберігає фізичну природу явищ, але змінює їх масштаб. Основою фізичного моделювання є теорія подібності, яка спирається на аналіз розмірностей [1]. В модельному експерименті дослідження проводять не з самим об'єктом, а з його заміником-моделлю.

Фізична модель машини повинна достатньо вірно відображати явище що досліджується. Фізична модель і натурний об'єкт повинні бути геометрично подібними; діючі на модель навантаження мають бути подібними навантаженням, які сприй-

маються натурними об'єктами; безрозмірні величини для моделі і натурального об'єкта мають бути рівними; матеріали моделі і натурального об'єкта можуть бути різними залежно від галузі дослідження, але зв'язок напружень і деформацій має відповідати закону Гука.

Кінцеві результати дослідження при фізичному моделюванні координуються за допомогою критеріїв подібності. Кількість критеріїв може бути меншою за кількість параметрів, що описують процес. До того ж кількість параметрів, що характеризують будь-який процес, можна скоротити шляхом їх групування у безрозмірні комплекси, виходячи з природи і умов досліджуваних

процесів. Саме ці безрозмірні комплекси називають критеріями подібності.

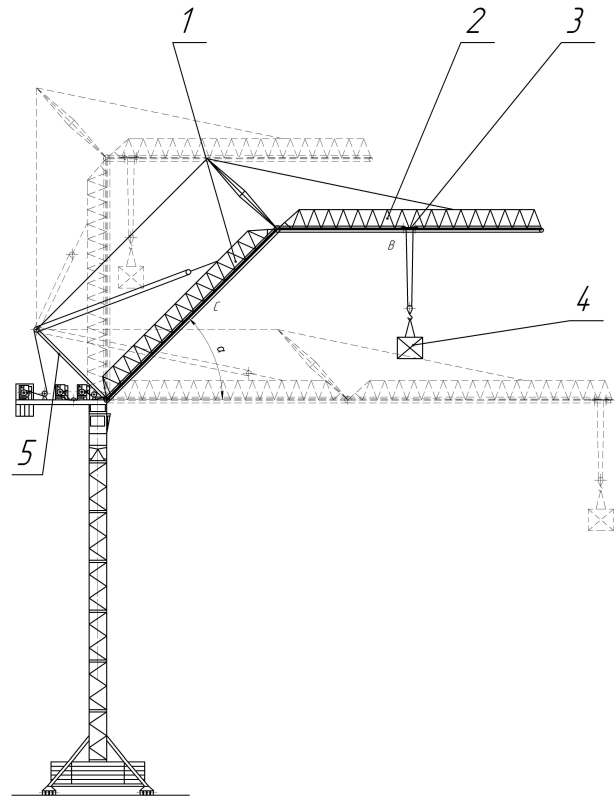
Рівність усіх однакових критеріїв подібності для двох фізичних явищ – необхідна і достатня умова їх подібності. Однаковими мають бути лише безрозмірні критерії подібності, що характеризують натурний об'єкт і модель. Ця властивість подібних явищ покладена в основу фізичного моделювання реальних об'єктів. За умовою відомих рівнянь, що описують фізичний процес, критерії подібності формуються шляхом приведення цього рівня до безрозмірного критеріального виду [2].

По фізичному моделюванню написана велика кількість праць. Так, у роботах [1,2], значна увага приділена побудові фізичних і математичних моделей технічних систем. В книгах [6,7] розглянуті інженерні методи вирішення задач, які виникають при проектуванні різноманітного обладнання для наукових експериментів. У роботі [8] викладаються загальна теорія розмірностей фізичних величин, теорія механічної та фізичної подібності, а також теорія моделювання. Книга [9] містить основи теорії та рекомендації практичних застосувань проведення експериментальних досліджень на натурних об'єктах, а також на фізичних, аналогових, цифрових та математичних моделях. У роботі [10] викладаються загальні принципи аналізу фізичної подібності та її зв'язок з побудовою фізико-математичних моделей. Крім того розглядаються конструкції та фізична інтерпретація фундаментальних критеріїв подібності.

Разом з тим теоретичні дослідження знайшли своє практичне застосування. Так, наприклад, у статті [11] розглянуто основні принципи створення фізичної моделі стрілової системи порталного крана, а в статті [12] розглядаються основні положення побудови фізичної моделі стрілової системи самохідного крана. В роботі [13] розглянуто методику проведення експериментального дослідження робочих процесів на змодельованій фізичній моделі краноманіпулятор з гідроприводом.

Спираючись на раніше проведенні теоретичні і практичні дослідження запропоновано створити фізичну модель шарнірно-

зчленованої стрілової системи баштового крана Liebherr 140 hc-k [5] (рис.1), яка б відображала фізичні процеси зміни його вильоту.



**Рис. 1.** Баштовий кран з шарнірно-зчленованою стріловою системою: 1 – основна секція; 2 – допоміжна секція; 3 – вантажний візок; 4 – вантаж; 5 – стояк.

**Fig. 1.** Articulated jib tower crane: 1 – foot jib; 2 – head jib; 3 – trolley; 4 – payload; 5 – stilt

## МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета дослідження полягає у визначенні основних параметрів фізичної моделі шарнірно-зчленованої стрілової системи баштового крана, що відображає процеси зміни вильоту вантажу за рахунок переміщення стрілової системи та вантажного візка.

## ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Зміна вильоту вантажу в баштових кранах з шарнірно-зчленованою стріловою системою виконується при переміщеннях стрілової системи та вантажного візка [3]. Тому за основу моделювання взяті рівняння руху які описують ці процеси у [4],

$$\left\{ \begin{aligned}
 & J_0 \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + m_0 \frac{d^2 \alpha}{dt^2} L^2 + \\
 & + m_1 \frac{d^2 \alpha}{dt^2} L^2 + m \frac{d^2 \alpha}{dt^2} L^2 + \\
 & + m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} L \sin \alpha + m \frac{d^2 x}{dt^2} L \sin \alpha = \\
 & = M_\alpha - \left( \frac{m_C}{2} + m_0 + m_1 + m \right) g L \cos \alpha; \\
 & m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} - m_1 L \frac{d^2 \alpha}{dt^2} \sin \alpha - \\
 & - m_1 L \left( \frac{d\alpha}{dt} \right)^2 \cos \alpha = \\
 & = P + mg \frac{x - x_1}{l} - W; \\
 & \frac{d^2 x}{dt^2} - L \frac{d^2 \alpha}{dt^2} \sin \alpha - L \left( \frac{d\alpha}{dt} \right)^2 \cos \alpha = \\
 & = -g \frac{x - x_1}{l},
 \end{aligned} \right. \quad (1)$$

де  $\alpha$  – кутова координата переміщення основної секції стрілової системи;  $x_1, x$  – лінійні координати переміщення центрів мас візка та вантажу;  $J_0, m_C$  – момент інерції відносно осі обертання та маса основної секції шарнірно-зчленованої стрілової системи;  $m_0$  – маса допоміжної секції стрілової системи;  $m_1$  – маса вантажного візка;  $m$  – маса вантажу;  $L$  – довжина основної секції стрілової системи;  $l$  – довжина підвісу вантажу;  $M_\alpha$  – рушійний момент підйому стрілової системи;  $P$  – рушійна сила переміщення вантажного візка;  $W$  – сила статичного опору переміщенню візка;  $g$  – прискорення вільного падіння.

Враховуючи те, що символи диференціювання та інтегрування (які входять у початкові рівняння) можуть бути відкинуті, бо вони не мають розмірності, систему рівнянь можна записати у наступному вигляді:

$$\left\{ \begin{aligned}
 & J_0 \frac{\alpha}{t^2} + m_0 \frac{\alpha}{t^2} L^2 + \\
 & + m_1 \frac{\alpha}{t^2} L^2 + m \frac{\alpha}{t^2} L^2 + \\
 & + m_1 \frac{x_1}{t^2} L \sin \alpha + m \frac{x}{t^2} L \sin \alpha = \\
 & = M_\alpha - \left( \frac{m_C}{2} + m_0 + m_1 + m \right) g L \cos \alpha; \\
 & m_1 \frac{x_1}{t^2} - m_1 L \frac{\alpha}{t^2} \sin \alpha - \\
 & - m_1 L \left( \frac{\alpha}{t} \right)^2 \cos \alpha = \\
 & = P + mg \frac{x - x_1}{l} - W; \\
 & \frac{x}{t^2} - L \frac{\alpha}{t^2} \sin \alpha - L \left( \frac{\alpha}{t} \right)^2 \cos \alpha = \\
 & = -g \frac{x - x_1}{l},
 \end{aligned} \right. \quad (2)$$

Перепишемо систему рівнянь (2) для натурального баштового крана (3) і його фізичної моделі (4). Усі параметри системи рівнянь позначимо індексами: для натурної машини – буквою «H»

$$\left\{ \begin{aligned}
 & J_{0H} \frac{\alpha_H}{t_H^2} + m_{0H} \frac{\alpha_H}{t_H^2} L_H^2 + \\
 & + m_{1H} \frac{\alpha_H}{t_H^2} L_H^2 + m_H \frac{\alpha_H}{t_H^2} L_H^2 + \\
 & + m_{1H} \frac{x_{1H}}{t_H^2} \cdot L_H \sin \alpha_H + \\
 & + m_H \frac{x_H}{t_H^2} L_H \sin \alpha_H = M_{\alpha H} - \\
 & - \frac{m_{CH}}{2} g L_H \cos \alpha_H - \\
 & - m_{0H} g L_H \cos \alpha_H - \\
 & - m_{1H} g L_H \cos \alpha_H - \\
 & - m_H g L_H \cos \alpha_H; \\
 & m_{1H} \frac{x_{1H}}{t_H^2} - m_{1H} L_H \frac{\alpha_H}{t_H^2} \sin \alpha_H - \\
 & - m_{1H} L_H \frac{\alpha_H^2}{t_H^2} \cos \alpha_H =
 \end{aligned} \right. \quad (3)$$

$$= P_H + m_H g \frac{x_H - x_{H1}}{l_H} - W;$$

$$\frac{x_H}{t_H^2} - L_H \frac{\alpha_H}{t_H^2} \sin \alpha_H -$$

$$- L_H \frac{\alpha_H^2}{t_H^2} \cos \alpha_H =$$

$$= -g \frac{x_H - x_{1H}}{l_H};$$

а для моделі – «М»

$$J_{0M} \frac{\alpha_M}{t_M^2} + m_{0M} \frac{\alpha_M}{t_M^2} L_M^2 +$$

$$+ m_{1M} \frac{\alpha_M}{t_M^2} L_M^2 + m_M \frac{\alpha_M}{t_M^2} L_M^2 +$$

$$+ m_{1M} \frac{x_{1M}}{t_M^2} L_M \sin \alpha_M +$$

$$+ m_M \frac{x_M}{t_M^2} L_M \sin \alpha_M = M_{\alpha M} -$$

$$- \frac{m_{CM}}{2} g L_M \cos \alpha_M -$$

$$- m_M g L_M \cos \alpha_M -$$

$$- m_{1M} g L_M \cos \alpha_M -$$

$$- m_M g L_M \cos \alpha_M;$$

$$m_{1M} \frac{x_{1M}}{t_M^2} - m_{1M} L_M \frac{\alpha_M}{t_M^2} \sin \alpha_M -$$

$$- m_{1M} L_M \frac{\alpha_M^2}{t_M^2} \cos \alpha_M =$$

$$= P_M + m_M g \frac{x_M - x_{1M}}{l_M} - W_M;$$

$$\frac{x_M}{t_M^2} - L_M \frac{\alpha_M}{t_M^2} \sin \alpha_M -$$

$$- L_M \frac{\alpha_M^2}{t_M^2} \cos \alpha_M =$$

$$= -g \frac{x_M - x_{1M}}{l_M}.$$

Виходячи з подібності фізичної моделі й натурної шарнірно-зчленованої стрілової системи крана, поділимо відповідні доданки систем рівнянь (3) і (4) між собою і запишемо співвідношення:

$$\frac{J_{0H} \frac{\alpha_H}{t_H^2}}{J_{0M} \frac{\alpha_M}{t_M^2}} = \frac{m_{0H} \frac{\alpha_H}{t_H^2} L_H^2}{m_{0M} \frac{\alpha_M}{t_M^2} L_M^2} =$$

$$\frac{m_{1H} \frac{\alpha_H}{t_H^2} L_H^2}{m_{1M} \frac{\alpha_M}{t_M^2} L_M^2} = \frac{m_H \frac{\alpha_H}{t_H^2} L_H^2}{m_M \frac{\alpha_M}{t_M^2} L_M^2} =$$

$$\frac{m_{1H} \frac{x_{1H}}{t_H^2} L_H \sin \alpha_H}{m_{1M} \frac{x_{1M}}{t_M^2} L_M \sin \alpha_M} =$$

$$\frac{m_H \frac{x_H}{t_H^2} L_H \sin \alpha_H}{m_M \frac{x_M}{t_M^2} L_M \sin \alpha_M} = \frac{M_{\alpha H}}{M_{\alpha M}} =$$

$$\frac{\frac{m_{CH}}{2} g L_H \cos \alpha_H}{\frac{m_{CM}}{2} g L_M \cos \alpha_M} =$$

$$\frac{m_{0H} g L_H \cos \alpha_H}{m_{0M} g L_M \cos \alpha_M} =$$

$$\frac{m_{1H} g L_H \cos \alpha_H}{m_{1M} g L_M \cos \alpha_M} =$$

$$\frac{m_H g L_H \cos \alpha_H}{m_M g L_M \cos \alpha_M};$$

$$\frac{m_{1H} \frac{x_{1H}}{t_H^2}}{m_{1M} \frac{x_{1M}}{t_M^2}} = \frac{m_{1H} L_H \frac{\alpha_H}{t_H^2} \sin \alpha_H}{m_{1M} L_M \frac{\alpha_M}{t_M^2} \sin \alpha_M} =$$

$$\frac{m_{1H} L_H \frac{\alpha_H^2}{t_H^2} \cos \alpha_H}{m_{1M} L_M \frac{\alpha_M^2}{t_M^2} \cos \alpha_M} = \frac{P_H}{P_M} =$$

$$\frac{m_H g \frac{x_H - x_{H1}}{l_H}}{m_M g \frac{x_M - x_{1M}}{l_M}} = \frac{W_H}{W_M};$$

$$\frac{m_H g \frac{x_H - x_{H1}}{l_H}}{m_M g \frac{x_M - x_{1M}}{l_M}} = \frac{W_H}{W_M};$$

$$\frac{m_H g \frac{x_H - x_{H1}}{l_H}}{m_M g \frac{x_M - x_{1M}}{l_M}} = \frac{W_H}{W_M};$$

$$\frac{m_H g \frac{x_H - x_{H1}}{l_H}}{m_M g \frac{x_M - x_{1M}}{l_M}} = \frac{W_H}{W_M};$$

$$\frac{m_H g \frac{x_H - x_{H1}}{l_H}}{m_M g \frac{x_M - x_{1M}}{l_M}} = \frac{W_H}{W_M};$$

$$\frac{m_H g \frac{x_H - x_{H1}}{l_H}}{m_M g \frac{x_M - x_{1M}}{l_M}} = \frac{W_H}{W_M};$$

$$\frac{m_H g \frac{x_H - x_{H1}}{l_H}}{m_M g \frac{x_M - x_{1M}}{l_M}} = \frac{W_H}{W_M};$$

$$\frac{m_H g \frac{x_H - x_{H1}}{l_H}}{m_M g \frac{x_M - x_{1M}}{l_M}} = \frac{W_H}{W_M};$$

$$\frac{m_H g \frac{x_H - x_{H1}}{l_H}}{m_M g \frac{x_M - x_{1M}}{l_M}} = \frac{W_H}{W_M};$$

(5)

$$\frac{x_H}{t_H^2} = \frac{L_H \frac{\alpha_H}{t_H^2} \sin \alpha_H}{L_M \frac{\alpha_M}{t_M^2} \sin \alpha_M} =$$

$$= \frac{L_H \frac{\alpha_H^2}{t_H^2} \cos \alpha_H}{L_M \frac{\alpha_M^2}{t_M^2} \cos \alpha_M} = \frac{-g \frac{x_H - x_{1H}}{L_H}}{-g \frac{x_M - x_{1M}}{L_M}}.$$

Виразимо всі параметри натурної машини через відповідні параметри фізичної моделі та коефіцієнти подібності, тоді

$$\alpha_H = v_\alpha \alpha_M; t_H = v_t t_M; J_{0H} = v_J J_{0M};$$

$$m_{CH} = v_{m_c} m_{cM}; m_{0H} = v_{m_0} m_{0M};$$

$$m_{1H} = v_{m_1} m_{1M}; m_H = v_m m_M;$$

$$M_{\alpha H} = v_M M_{\alpha M}; L_H = v_L L_M;$$

$$x_{1H} = v_{x_1} x_{1M}; x_H = v_x x_M; l_H = v_l l_M;$$

$$W_H = v_W W_M; P_H = v_P P_M,$$

де  $v_\alpha$  – коефіцієнт подібності кутової координати переміщення основної секції стрілової системи;  $v_{x_1}, v_x$  – коефіцієнти подібності лінійних координат переміщення центрів мас візка та вантажу;  $v_J, v_{m_c}$  – коефіцієнти подібності моменту інерції відносно осі обертання та маси основної секції шарнірно-зчленованої стрілової системи;  $v_{m_0}, v_{m_1}, v_m$  – коефіцієнти подібності мас допоміжної секції стрілової системи, вантажного візка та вантажу відповідно;  $v_L, v_l$  – коефіцієнти подібності довжин основної секції стрілової системи та підвісу вантажу;  $v_M, v_P, v_W$  – коефіцієнти подібності рушійних: моменту підйому стрілової системи, сили переміщення вантажного візка та сили статичного опору переміщенню вантажного візка відповідно.

Використовуючи залежності (6), перепишемо систему рівнянь (5):

$$\frac{v_J J_{0M} \frac{v_\alpha \alpha_M}{v_t^2 t_M^2}}{J_{0M} \frac{\alpha_M}{t_M^2}} = \frac{v_{m_0} m_{0M} \frac{v_\alpha \alpha_M}{v_t^2 t_M^2} v_L^2 L_M^2}{m_{0M} \frac{\alpha_M}{t_M^2} L_M^2} =$$

$$= \frac{v_{m_1} m_{1M} \frac{v_\alpha \alpha_M}{v_t^2 t_M^2} v_L^2 L_M^2}{m_{1M} \frac{\alpha_M}{t_M^2} L_M^2} =$$

$$= \frac{v_m m_M \frac{v_\alpha \alpha_M}{v_t^2 t_M^2} v_L^2 L_M^2}{m_M \frac{\alpha_M}{t_M^2} L_M^2} =$$

$$= \frac{v_{m_1} m_{1M} \frac{v_{x_1} x_{1M}}{v_t^2 t_M^2} v_L L_M \sin(v_\alpha \alpha_M)}{m_{1M} \frac{x_{1M}}{t_M^2} L_M \sin \alpha_M} =$$

$$= \frac{v_m m_M \frac{v_x x_M}{v_t^2 t_M^2} v_L L_M \sin(v_\alpha \alpha_M)}{m_M \frac{x_M}{t_M^2} L_M \sin \alpha_M} =$$

$$= \frac{v_M M_{\alpha M}}{M_{\alpha M}} =$$

$$= \frac{\frac{v_{m_c} m_{cM}}{2} g v_L L_M \cos(v_\alpha \alpha_M)}{\frac{m_{cM}}{2} g L_M \cos \alpha_M} =$$

$$= \frac{v_{m_0} m_{0M} g v_L L_M \cos(v_\alpha \alpha_M)}{m_{0M} g L_M \cos \alpha_M} =$$

$$= \frac{v_{m_1} m_{1M} g v_L L_M \cos(v_\alpha \alpha_M)}{m_{1M} g \cdot L_M \cos \alpha_M} =$$

$$= \frac{v_m m_M \cdot g \cdot v_L L_M \cdot \cos(v_\alpha \alpha_M)}{m_M \cdot g \cdot L_M \cdot \cos \alpha_M};$$

$$\frac{\frac{v_x x_M}{v_t^2 t_M^2}}{\frac{x_M}{t_M^2}} = \frac{v_L L_M \frac{v_\alpha \alpha_M}{v_t^2 t_M^2} \sin(v_\alpha \alpha_M)}{L_M \frac{\alpha_M}{t_M^2} \sin \alpha_M} =$$

$$= \frac{v_L L_M \frac{v_\alpha \alpha_M^2}{v_t^2 t_M^2} \cos(v_\alpha \alpha_M)}{L_M \frac{\alpha_M^2}{t_M^2} \cos \alpha_M} =$$

$$= \frac{-g \frac{v_x x_M - v_{x_1} x_{1M}}{v_l l_M}}{-g \frac{x_M - x_{1M}}{l_M}}.$$

Скоротимо рівняння (7), вважаючи, що коефіцієнт подібності  $v_\alpha = 1$ , оскільки при фізичному моделюванні кутові координати не підлягають масштабуванню (тобто  $\alpha_M = \alpha_H$ ) будемо мати:

$$\begin{aligned}
 v_J \frac{v_\alpha}{v_t} &= v_{m_0} \frac{v_\alpha}{v_t} v_L^2 = \\
 &= v_{m_1} \frac{v_\alpha}{v_t} v_L^2 = v_m \frac{v_\alpha}{v_t} v_L^2 = \\
 &= v_{m_1} \frac{v_{x_1}}{v_t} v_L = v_m \frac{v_x}{v_t} v_L = \\
 &= v_M = v_{m_C} v_L = v_m v_L = \\
 &= v_{m_1} v_L = v_m v_L; \\
 v_{m_1} \frac{v_{x_1}}{v_t} &= v_{m_1} v_L \frac{v_\alpha}{v_t} = \\
 &= v_{m_1} v_L \frac{v_\alpha^2}{v_t^2} = v_P = \\
 &= v_m \frac{v_x}{v_l} = v_W; \\
 \frac{v_x}{v_t} &= v_L \frac{v_\alpha}{v_t} = v_L \frac{v_\alpha^2}{v_t^2} = \frac{v_x}{v_l}.
 \end{aligned} \tag{8}$$

Аналізуючи вирази (8) можна записати:

$$\begin{aligned}
 v_{m_0} &= v_{m_1} = v_m = v_P = v_W; \\
 v_L &= v_x = v_{x_1} = v_l; \\
 v_J &= v_{m_0} v_L^2; \\
 v_t &= \sqrt{v_L}.
 \end{aligned} \tag{9}$$

Знайдемо коефіцієнти подібності для маси та довжини ланок. Для цього задамо довжину  $L_M = 1,51$  м та масу  $m_{CM} = 18,3$  кг основної секції моделі шарнірно-зчленованої стрілової системи, і як результат отримаємо:

$$\begin{aligned}
 v_{m_0} &= \frac{m_{CM}}{m_{0H}} = \frac{5500}{18,3} = 300; \\
 v_L &= \frac{L_H}{L_M} = \frac{26}{1,51} = 17,2.
 \end{aligned} \tag{10}$$

Використовуючи залежності (8) та значення виразів (9), вираховуємо коефіцієнти подібності моменту інерції та часу:

$$\begin{aligned}
 v_J &= v_{m_0} v_L^2 = 300 \cdot 17,2^2 = 88752; \\
 v_t &= \sqrt{v_L} = \sqrt{17,2} = 4,15.
 \end{aligned} \tag{11}$$

За допомогою отриманих значень коефіцієнтів подібності (9) і (10) та відомих параметрів шарнірно-зчленованої стрілової системи крана Liebherr 140 hc-k визначимо деякі параметри фізичної моделі шарнірно-зчленованої стрілової системи:

– довжина допоміжної секції стрілової системи

$$L_{0M} = \frac{L_{0H}}{v_L} = \frac{27,7}{17,2} = 1,61 \text{ м};$$

– маса допоміжної секції стрілової системи

$$m_{0M} = \frac{m_{0H}}{v_{m_0}} = \frac{2500}{300} = 8,33 \text{ кг};$$

– маса вантажного візка

$$m_{1M} = \frac{m_{1H}}{v_{m_1}} = \frac{500}{300} = 1,67 \text{ кг};$$

– середня кутова швидкість основної секції стрілової системи

$$\omega_M = \frac{\omega_H}{v_\alpha} = \frac{0,0088}{\frac{1}{4,15}} = 0,036 \text{ рад/с};$$

– швидкість переміщення вантажного візка

$$v_M = \frac{v_H}{\frac{v_x}{v_l}} = \frac{8}{\frac{17,2}{4,15}} = 0,0116 \text{ м/с}.$$

За отриманими параметрами побудована фізична модель натурної шарнірно-зчленованої стрілової системи крана Liebherr 140 hc-k. (рис.2), основні параметри якої наведені у таблиці.

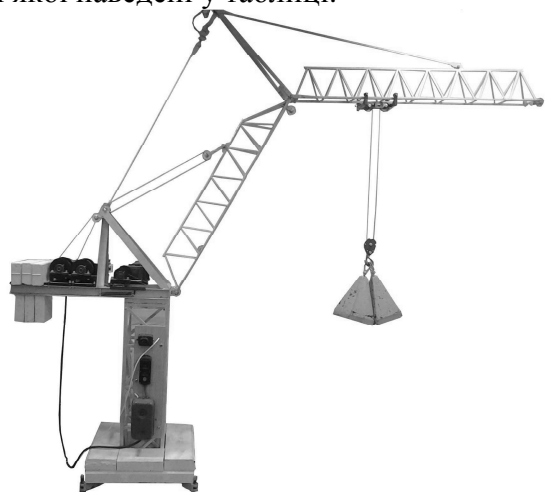


Рис. 2. Модель шарнірно-зчленованої стрілової системи

Fig. 2. Model of articulated jib of tower crane

**Таблиця 1.** Параметри натурної шарнірно-зчленованої стрілової системи та її фізичної моделі  
**Table 1.** Parameters of articulated jib and its physical model

Назва параметра	Значення параметра натурної машини	Значення параметра фізичної моделі
Кут переміщення основної секції шарнірно-зчленованої стрілової системи $\alpha$ , град	0...90	0...90
Кут нахилу стояка до горизонталі $\gamma$ , град	45	45
Довжина, м		
- основної секції $L$	26	1,50
- допоміжної секції $L_0$	27,7	1,65
- стояка	10,6	0,61
Маса, кг:		
- основної секції $m_C$	5500	18,3
- допоміжної секції $m_0$	2500	8,3
- візка $m_I$	500	1,7
Вантажопідйомність $m$ , кг:		
- на максимальному вильоті	2000	6,7
- на мінімальному вильоті	12000	40
Середня кутова швидкість основної секції стрілової системи, рад/с	0,0088	0,036
Швидкість вантажного візка м/хв.	8 16 50 95	1,92 3,85 12,05 22,89
Час переміщення візка з крайнього дальнього в крайнє ближнє положення допоміжної секції стрілової системи $T$ , с	207,7 101,3 33,2 17,5	51,7 25,7 8,2 4,3
Час підйому шарнірно-зчленованої стрілової системи $T_I$ , с	180	43,4
Потужність двигуна механізму підйому стрілової системи, кВт	37,5	0,120
Потужність двигуна механізму переміщення вантажного візка, кВт	4,6	0,06

## ВИСНОВКИ

1. Використані принципи механічної подібності для створення фізичної моделі шарнірно-зчленованої стрілової системи баштового крана. За основу визначення критеріїв подібності взяті рівняння руху, які відображають явище зміни вильоту шарнірно-зчленованої стрілової системи. При визначенні критеріїв та коефіцієнтів подібності встановлено, що коефіцієнти подібності мають різні значення. Так, у фізичній моделі ланки шарнірно-зчленованої стрілової системи баштового крана, у 17,2 рази менші, а їх швидкості у 4,15 рази вищі. Це зумовлено тим, що динамічні явища, які проходять у моделі і натурній машині, повинні бути у певній відповідності.

2. На основі принципів фізичного моделювання визначено основні параметри фі-

зичної моделі шарнірно-зчленованої стрілової системи баштового крана. За цими параметрами побудована фізична модель шарнірно-зчленованої стрілової системи баштового крана для проведення експериментальних досліджень зміни його вильоту за рахунок переміщень шарнірно-зчленованої стрілової системи та вантажного візка.

## ЛІТЕРАТУРА

1. *Ловейкін В.С.* Теорія технічних систем / В.С. Ловейкін, І.І. Назаренко, О.Г. Онищенко. – Київ – Полтава: ІЗМН-ПДТУ, 1998. – 200 с.
2. *Хубка В.* Теорія технических систем / В.Хубка. – М.:1987. – 208 с.
3. *Невзоров Л.А.* Башенные краны / Л.А. Невзоров. – М.: Высш. Школа, 1980.-326 с.
4. *Ловейкін В.С., Шевчук О.Г.* Аналіз зміни вильоту баштового крана з шарнірно-

зчленованою стріловою системою // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини – 2013. –№82. –С.20-27.

5. *Datenblatt Nr. 120 P-2278-H 1 DIN - 105018-1.83*

6. *Персов Б.З.* Расчет и проектирование экспериментальных установок / Б.З.Петров. – Москва – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2006. – 348 с.

7. *Баранчук В.И.* Планирования эксперимента в технике / В.И. Баранчук. – К.: Техніка, 1984. – 200 с.

8. *Седов Л.И.* Методы подобия и размерности в механике / Л.И. Седов. – М.: Наука, 1977. – 440 с.

9. *Веников В.А.* Теория подобия и моделирования / В.А. Веников. – М.: Высш. школа, 1976. – 479 с.

10. *Кутателадзе С.С.* Анализ подобия и физические модели / С.С. Кутателадзе – Новосибирск: Наука, 1986.- 288 с.

11. *Ловейкін В.С., Паламарчук Д.А.* Створення фізичної моделі шарнірно-зчленованої стрілової системи крана // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини –2010. –№75. –С.26-32.

12. *Подольак О.С., Родіонов Л.А.* Дослідження динамічних навантажень стрілової системи самохідних кранів за допомогою фізичної моделі // Науковий вісник будівництва –2009. – №56.

13. *Ловейкін В.С., Міщук Д.О.* Експериментальна модель крана маніпулятора з гідроприводом на транспортному засобі // Науковий вісник херсонської державної морської академії –2011. –№1. –С.204-214.

4. *Loveykín V.S., Shevchuk O.H.* 2013. [Analysis of luffing of articulated jib tower crane] // *Gírnichí, budível'ní, dorozhní ta melíorativní mashini*, Vol. 82, 20-27.

5. *Datenblatt Nr. 120 P-2278-H 1 DIN - 105018-1.83*

6. *Persov B.Z.* 2006. Raschet i proyektirovaniye eksperimental'nykh ustanovok [Calculation and design experimental facilities]. Moscow, Izhevsk NITS «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika» 348.

7. *Baranchuk V.I.* 1984. Planirovaniya eksperimenta v tekhnike [Experiment planning in the technique]. Kyiv, Tekhnika Publ., 200.

8. *Sedov L.I.*, 1977. Metody podobiya i razmernosti v mekhanike [Similarity and dimensional methods in mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 440.

9. *Venikov V.A.* 1976. Teoriya podobiya i modelirovaniya [Similarity theory and modeling]. Moscow, Vyssh. shkola Publ., 479.

10. *Kutateladze S.S.* 1986. Analiz podobiya i fizicheskije modeli [Analysis of similarity and physical models]. Novosibirsk, Nauka Publ., 288.

11. *Loveykín V.S., Palamarchuk D.A.* 2010. Stvorenniya fízichnoí modelí sharnírno-zchlenovanoí strílovoí sistemi kрана [Creating a physical model of the joint-articulated jib crane system] *Gírnichí, budível'ní, dorozhní ta melíorativní mashini*, Vol. 75, 26-32.

12. *Podolyak O.S., Rodionov L.A.* 2009. Doslízhennya dinamíchnikh navantazhen' strílovoí sistemi samokhídnykh kranív za dopomogoyu fízichnoí modelí [The study of dynamic loads boom mobile cranes by using a physical model]. *Naukoviy vísnik budívntstva*, Vol. 56.

13. *Loveykín V.S., Míshchuk D.O.* 2011. Yeksperimental'na model' kрана manípulyatora z gídoprivodom na transportnomu zasobí [An experimental model of the crane with hydraulic manipulator in a vehicle]. *Naukoviy vísnik khersons'koí derzhavnoí mors'koí akademíi* Vol. 1., 204-214.

### REFERENCES

1. *Loveykín V.S., Nazarenko I.I., Onishchenko O.G.*, 1998. *Teoriya tekhnicheskikh sistem* [Theory of technical systems]. Kyiv, Poltava, ÍZMN–PDTU Publ., 200.

2. *Khubka V.* 1987. *Teoriya tekhnicheskikh sistem* [Theory of technical systems]. Moscow, 208.

3. *Nevzorov L.A.* 1980. *Bashennyye kраны* [Tower cranes]. Moscow, Vyssh. Shkola Publ., 326.