

УДК 621.86.06.001.24

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЛЕСОПОГРУЗЧИКА БАШЕННОГО ТИПА В СЛУЧАЕ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ РАЗГРУЗКИ ГРЕЙФЕРА

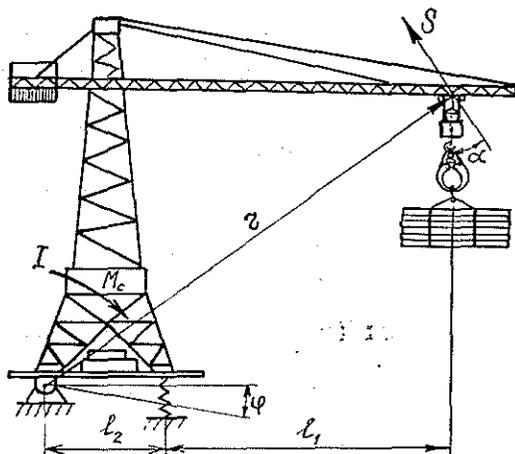
З. Д. ВТЮРИНА

Архангельский лесотехнический институт

Общезвестны обязательные при расчете всех стреловых и башенных кранов методика Госгортехнадзора СССР и методика расчета башенных кранов, разработанная ВНИИстройдормашем и вошедшая в ГОСТ 13984—75.

Однако эти методики, предназначенные для определения устойчивости кранов «при действии опасной комбинации нагрузок» (наиболее неблагоприятном сочетании их) «относительно ребра опрокидывания, при которой кран по устойчивости максимально приближается к предельному состоянию», не могут быть использованы для исследования динамических коэффициентов устойчивости крана в процессе выполнения им различных технологических операций с учетом возможности получения не только экстремальных, но и промежуточных значений динамических коэффициентов устойчивости.

Поэтому исследования динамических коэффициентов устойчивости лесопогрузчика башенного типа (крана) при различных вариантах освобождения от пачки круглых лесоматериалов проведены автором с использованием двух критериев оценки устойчивого состояния: предельного угла опрокидывания и соотношения удерживающих и опрокидывающих моментов, действующих на лесопогрузчик.



При определении предельного угла опрокидывания лесопогрузчика использована методика проф. М. С. Комарова [5].

Исследуем наиболее опасный случай разгрузки лесопогрузчика башенного типа, оснащённого грейфером, — внезапный обрыв груза (пачки бревен, подвешенной к грейферу, что равнозначно обрыву замыкающего грейфера каната, т. е. случай экстремальной разгрузки грейфера).

По аналогии с работой М. С. Комарова [5] представим лесопогрузчик в виде системы с двумя степенями свободы при жестко закреплённых стреле к остова лесопогрузчика (см. рисунок) и грейфера к стреле. Известно, что «при наличии подвешенной стрелы обрыв груза менее опасен для устойчивости кранов» [5].

Примем следующие обозначения:

- $Q_0$  — сила тяжести (вес) обрывающегося груза (пачки бревен);
- $m_1^c$  — масса стрелы, статически приведенная к грузу (к конечной точке стрелы);
- $m_1^d$  — масса стрелы с грейфером, динамически приведенная к конечной точке стрелы:  $m_1^d = m_1^{cd} + m_r$ , где  $m_1^{cd}$  — масса стрелы без грейфера, динамически приведенная к конечной точке стрелы;  $m_r$  — масса грейфера;
- $c_1$  — жесткость стрелы;
- $c_2$  — жесткость подкранового пути;
- $S$  — координата конечной точки стрелы;
- $\varphi$  — угловая координата остова лесопогрузчика;
- $I$  — момент инерции лесопогрузчика относительно оси шарнирной опоры (без стрелы);
- $M_c$  — статический момент устойчивости лесопогрузчика с грейфером (без груза);
- $M_c^d$  — статический момент устойчивости лесопогрузчика без грейфера (без груза);
- $M_c^r$  — дополнительный статический момент устойчивости лесопогрузчика от веса грейфера (без груза);
- $l_1$  — вылет крюка лесопогрузчика от упругой опоры;
- $l_2$  — расстояние между опорами лесопогрузчика;
- $g$  — ускорение силы тяжести;
- $r$  — расстояние от конечной точки стрелы до оси шарнирной опоры лесопогрузчика.

В качестве обобщенных координат выберем линейную координату  $S$ , определяющую положение точки подвеса стрелы, и угловую координату  $\varphi$ , фиксирующую положение остова лесопогрузчика относительно его опор. Влияние затухания колебаний учитывать не будем. Это допущение обосновывается в работах А. А. Зарецкого [4] и Д. П. Волкова [1].

Соответственно двум принятым обобщенным координатам составим два уравнения Лагранжа второго рода:

а) уравнение движения конечной точки стрелы лесопогрузчика после обрыва груза

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{S}} - \frac{\partial T}{\partial S} = Q_S; \quad (1)$$

б) уравнение движения (колебания) остова лесопогрузчика

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} - \frac{\partial T}{\partial \varphi} = Q_\varphi, \quad (2)$$

где  $Q_S$  и  $Q_\varphi$  — обобщенные силы;

$$Q_S = - \frac{\partial \Pi}{\partial S}; \quad Q_\varphi = - \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi};$$

$T$  — кинетическая энергия стрелы ( $T_1$ ) и лесопогрузчика ( $T_2$ ), определяемая по формулам:

$$T_1 = \frac{m_1^d \dot{S}^2}{2}; \quad T_2 = \frac{I \dot{\varphi}^2}{2};$$

$\Pi$  — потенциальная энергия стрелы ( $\Pi_1$ ) и лесопогрузчика ( $\Pi_2$ ) соответственно, равная:

$$\Pi_1 = \frac{(S - r\varphi)^2 c_1}{2} - m_1^c g S \cos \alpha - m_r g S \cos \alpha;$$

$$\Pi_2 = \frac{(L_2 \varphi)^2 c_2}{2} - M_c \varphi - r c_1 S \varphi + r^2 c_1 \frac{\varphi^2}{2} + m_1^c g (L_1 + L_2) \varphi + m_r g (L_1 + L_2) \varphi;$$

$S$  и  $\varphi$  — обобщенные координаты;

$\dot{S}$  и  $\dot{\varphi}$  — соответствующие им обобщенные скорости.

Выполнив преобразования, получим два дифференциальных уравнения:

$$\ddot{S} + \frac{c_1 S}{m_1^a} = \frac{r c_1}{m_1^a} \varphi + \frac{m_1^c}{m_1^a} g \cos \alpha + \frac{m_r}{m_1^a} g \cos \alpha; \quad (3)$$

$$\ddot{\varphi} + \left( \frac{r^2 c_1}{I} + \frac{l_2^2 c_2}{I} \right) \varphi = \frac{r c_1}{I} S + \frac{M_c}{I} - \frac{m_1^c g}{I} (L_1 + L_2) - \frac{m_r g}{I} (L_1 + L_2).$$

Решая совместно эти уравнения, после замены  $r \cos \alpha = l_1 + l_2$  имеем:

$$\frac{d^4 \varphi}{dt^4} + \left( \frac{l_2^2 c_2 + r^2 c_1}{I} + \frac{c_1}{m_1^a} \right) \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \frac{l_2^2 c_1 c_2}{I m_1^a} \varphi = \frac{M_c c_1}{I m_1^a}. \quad (4)$$

Уравнение (4) запишем в следующем виде:

$$\varphi^{IV} + 2n^2 \varphi^{II} + K^4 \varphi = C, \quad (5)$$

где

$$n^2 = \frac{1}{2} \left( \frac{l_2^2 c_2 + r^2 c_1}{I} + \frac{c_1}{m_1^a + m_r} \right);$$

$$K^4 = \frac{l_2^2 c_1 c_2}{(m_1^c + m_r) I}; \quad C = \frac{M_c c_1}{I (m_1^c + m_r)}.$$

Пользуясь традиционными методами, решим уравнение (5) в виде:

$$\varphi = - \frac{Q_6 (L_1 + L_2)}{l_2^2 c_2 (K_1^2 - K_2^2)} (K_2^2 \cos K_1 t - K_1^2 \cos K_2 t) + \frac{M_c}{l_2^2 c_2}, \quad (6)$$

что аналогично решению в работе [5].

Так как  $K_1$  значительно больше  $K_2$  ( $K_1 = 42,2 \text{ с}^{-1}$ ,  $K_2 = 0,98 \text{ с}^{-1}$ ), то приближенно считая  $K_1^2 - K_2^2 = K_1^2$  и  $K_1^2 + K_2^2 = K_1^2$ , находим:

$$\varphi_{max} = - \frac{Q_6 (L_1 + L_2)}{l_2^2 c_2} + \frac{M_c}{l_2^2 c_2}. \quad (7)$$

В критическом случае, когда давление правой опоры равно нулю, еще сохраняется устойчивость лесопогрузчика, т. е.  $\varphi_{max} > 0$ .

Из уравнения (7) в этом случае имеем

$$- \frac{Q_6 (L_1 + L_2) + M_c}{l_2^2 c_2} > 0,$$

откуда

$$- Q_6 (L_1 + L_2) + M_c > 0; \quad M_c > Q_6 (L_1 + L_2); \quad (8)$$

$$M_{д. опр}^{max} = Q_6 (L_1 + L_2). \quad (9)$$

Статический момент  $M_c$  определяется как разность удерживающего  $M_{с. уд}$  и опрокидывающего  $M_{с. опр}$  моментов, вычисленных относительно наружного ребра опрокидывания:

$$M_c = M_{c.уд} - M_{c.опр}.$$

Динамический удерживающий момент

$$M_{л.уд} = M_{c.уд} - (M_{c.опр} + M_{л.опр}^{max}),$$

где  $M_{л.опр}^{max}$  — определяется по формуле (9).

Статический коэффициент устойчивости

$$K_c = \frac{M_{c.уд}}{M_{c.опр}}. \quad (10)$$

Динамический коэффициент устойчивости

$$K_d = \frac{M_{c.уд}}{M_{c.опр} + M_{л.опр}^{max}}. \quad (11)$$

Определим  $\varphi_{max}$ ,  $K_c$  и  $K_d$  для трех случаев разгрузки крана-лесопогрузчика:

а) отрыва пачки бревен массой  $m_6^{(1)}$ , подвешенной к грейферу массой  $m_r$  (случай экстремальной разгрузки грейфера);

б) обрыва пачки бревен массой  $m_6^{(2)} = m_6^{(1)}$ , подвешенной на крюк лесопогрузчика в стропах;

в) обрыва пачки бревен массой  $m_6^{(3)} = m_6^{(1)} + m_r$ , подвешенной на крюк лесопогрузчика в стропах;

$$M_c^{(a)} = M_c^л + M_c^r; \quad M_c^{(б)} = M_c^л; \quad M_c^{(в)} = M_c^л.$$

Формула (7) для определения  $\varphi_{max}$  соответственно примет вид

$$\varphi_{max}^{(a)} \approx -\frac{Q_6^{(1)}(l_1 + l_2)}{l_2^2 c_2} + \frac{M_c^л + M_c^r}{l_2^2 c_2}; \quad (7a)$$

$$\varphi_{max}^{(б)} \approx -\frac{Q_6^{(2)}(l_1 + l_2)}{l_2^2 c_2} + \frac{M_c^л}{l_2^2 c_2}; \quad (7б)$$

$$\varphi_{max}^{(в)} \approx -\frac{Q_6^{(3)}(l_1 + l_2)}{l_2^2 c_2} + \frac{M_c^л}{l_2^2 c_2}; \quad (7в)$$

где  $c_2 = 3,2 \cdot 10^4$  кН/м.

Опрокидывающий момент от силы тяжести (веса) элементов лесопогрузчика в каждом из трех случаев не зависит от вариантов разгрузки крюка:

$$M_{c.опр}^{(a)} = M_{c.опр}^{(б)} = M_{c.опр}^{(в)} = M_{c.опр}^л. \quad (12)$$

Удерживающий момент для рассматриваемых случаев выражается следующими зависимостями:

$$M_{c.уд}^{(a)} = M_{c.уд}^л + M_c^r; \quad M_{c.уд}^{(б)} = M_{c.уд}^л; \quad M_{c.уд}^{(в)} = M_{c.уд}^л. \quad (13)$$

С учетом этих зависимостей

$$K_c^{(a)} = \frac{M_{c.уд}^л + M_c^r}{M_{c.опр}^л}; \quad (10a)$$

$$K_c^{(б)} = K_c^{(в)} = \frac{M_{c.уд}^л}{M_{c.опр}^л}; \quad (10б)$$

$$K_d^{(a)} = \frac{M_{c.уд}^л + M_c^r}{M_{c.опр}^л + M_{л.опр}^{max(a)}}; \quad (11a)$$

$$K_d^{(6)} = \frac{M_{с. уд}^n}{M_{с. опр}^n + M_{д. опр}^{max(6)}}; \quad (116)$$

$$K_d^{(в)} = \frac{M_{с. уд}^n}{M_{с. опр}^n + M_{д. опр}^{max(в)}}. \quad (11в)$$

Влияние наличия грейфера на крюке лесопогрузчика на динамический коэффициент устойчивости выразим через соотношения

$$\lambda_1 = \frac{K_d^{(a)}}{K_d^{(6)}}; \quad \lambda_2 = \frac{K_d^{(a)}}{K_d^{(в)}}.$$

Примем  $m_6^{(1)} = 3,4$  т ( $Q_6^{(1)} = 33,3$  кН),  $m_6^{(2)} = 3,4$  т ( $Q_6^{(2)} = 33,3$  кН),  $m_6^{(3)} = 5$  т ( $Q_6^{(3)} = 49$  кН),  $m_r = 1,6$  т.

Подставив в формулы (7), (8) и (9) соответствующие принятым буквенным обозначениям числовые значения (величины  $c_1$  и  $c_2$  приведены в [2, рис. 2]), вычислим величины  $\varphi$ ,  $M_c$ ,  $M_{д. опр}^{max}$ ,  $K_c$  и  $K_d$  для трех вылетов крюка: 3,8; 15; 30 м.

Полученные числовые значения  $\varphi_{max}$ ,  $M_c$ ,  $M_{д. опр}^{max}$ ,  $K_c$  и  $K_d$ , а также  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  помещены в таблице (в числителе — без учета ветровой нагрузки, в знаменателе — с ее учетом). При расчетах нормативная ветровая нагрузка принята для рабочего состояния 245 Н/м<sup>2</sup>, для нерабочего — 686 Н/м<sup>2</sup>.

Коэффициент устойчивости лесопогрузчика при отрыве пачки бревен

Вылет крюка лесопогрузчика, м	$\varphi_{max} \times 10^{-4}$ , рад	$M_c$ , кН · м	$M_{д. опр}^{max}$ , кН · м	$K_c$	$K_d$	$\lambda_1$	$\lambda_2$
-------------------------------	--------------------------------------	----------------	-----------------------------	-------	-------	-------------	-------------

а) отрыв пачки бревен  $m_6^{(1)} = 3,4$  т, подвешенной к грейферу

3,8	$\frac{13,2}{6,9}$	$\frac{1741,6}{1024,3}$	226,4	$\frac{2,52}{1,55}$	$\frac{2,10}{1,30}$	$\frac{1,04}{1,04}$	$\frac{1,12}{1,09}$
	$\frac{12,1}{6,0}$	$\frac{2006,2}{1288,8}$		599,6	$\frac{2,76}{1,69}$	$\frac{1,80}{1,28}$	$\frac{1,10}{1,10}$
15,0	$\frac{10,9}{4,6}$	$\frac{2360,4}{1643,1}$	1098,9	$\frac{3,07}{1,88}$	$\frac{1,56}{1,18}$	$\frac{1,17}{1,17}$	$\frac{1,44}{1,37}$

б) обрыв пачки бревен  $m_6^{(2)} = 3,4$  т в стропях (без грейфера)

3,8	$\frac{12,4}{6,0}$	$\frac{1635,0}{917,7}$	226,4	$\frac{2,42}{1,49}$	$\frac{2,02}{1,33}$	—	—
	$\frac{9,8}{3,4}$	$\frac{1723,9}{1006,6}$		599,4	$\frac{2,52}{1,64}$	$\frac{1,64}{1,16}$	—
15,0	$\frac{6,3}{2,3}$	$\frac{1843,0}{1125,6}$	1098,9	$\frac{2,62}{1,60}$	$\frac{1,33}{1,01}$	—	—

в) обрыв пачки бревен  $m_6^{(3)} = 5$  т в стропях (без грейфера)

3,8	$\frac{11,2}{5,2}$	$\frac{1635,0}{917,7}$	333,2	$\frac{2,42}{1,49}$	$\frac{1,88}{1,27}$	—	—
	$\frac{7,2}{1,2}$	$\frac{1723,9}{1006,6}$		882,0	$\frac{2,52}{1,54}$	$\frac{1,41}{1,05}$	—
15,0	$\frac{2,0}{-4,3}$	$\frac{1843,0}{1125,6}$	1617,0	$\frac{2,62}{1,60}$	$\frac{1,08}{0,86}$	—	—

Из таблицы видно, что при отрыве пачки бревен массой 3,4 т, подвешенной к грейферу, соблюдается условие устойчивости в соответствии с [3] при всех вылетах крюка лесопогрузчика.

В отличие от случая обрыва груза, подвешенного в стропах, отрыв груза от грейфера (например, при обрыве замыкающего грейфер каната) следует рассматривать как отрыв лишь части груза, находящегося на крюке, ибо при отрыве пачки массой 3,4 т на крюке еще остается грейфер массой 1,6 т, составляющей 47 % массы груза, или 32 % первоначальной массы на крюке. Это обстоятельство, учитываемое при расчете статического момента  $M_c$  и угла  $\varphi$ , обеспечивает больший коэффициент устойчивости, чем при обрыве груза этой же массы (3,4 т), подвешенной в стропном комплекте, т. е. без грейфера.

Наличие грейфера ( $m_r = 1,6$  т) увеличивает коэффициент динамической устойчивости до 4...17 % при изменении вылета крюка от 3,8 до 30 м соответственно по сравнению с вариантом обрыва пачки бревен той же массы ( $m_b = 3,4$  т), подвешенной непосредственно в стропах.

Обрыв пачки массой 5 т, подвешенной на крюк в стропах, или грейфера с пачкой бревен вызывает появление больших по величине динамических усилий. При наличии нормативной ветровой нагрузки обрыв пачки массой 5 т опасен при вылете 15 м и более. При вылете 30 м в любую погоду устойчивость лесопогрузчика не обеспечивается.

Из приведенного теоретического исследования различных вариантов освобождения груза с крюка лесопогрузчика следует, что даже в случае экстремальной разгрузки грейфера устойчивость лесопогрузчика не нарушается. Это обусловлено демпфирующим действием остающегося на крюке порожнего грейфера. Отсюда также следует, что при технологическом процессе выгрузки бревен такой же массы (3,4 т) из грейфера «на весу» (за определенный промежуток времени  $t_b = 0,7 \dots 2,8$  с) влияние этого процесса на устойчивость лесопогрузчика еще меньше, чем в предыдущем случае (при  $t_b \rightarrow 0$ ).

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Волков Д. П. Динамические нагрузки в универсальных экскаваторах-кранах.— М.: Машгиз, 1958.— 268 с. [2]. Втюрина Э. Д., Шекалов Е. А. Расчет жесткости упругих элементов лесопогрузчика // Лесн. пром-сть.— 1980.— № 7.— С. 29. [3]. Госгортехнадзор СССР. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов.— М.: Металлургия, 1970.— 191 с. [4]. Зарецкий А. А. Исследование колебаний башенных кранов с поворотной колонной при работе механизма подъема // Исследование башенных кранов: Тр. / ВНИИСтройдормаш.— М., 1963. [5]. Комаров М. С. Динамика грузоподъемных машин.— М.; К.: Машгиз, 1952.— 267 с.

Поступила 9 марта 1987 г.

УДК 625.576.4.001

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ ВТОРИЧНОГО ИЗГИБА ОТ ПАРАМЕТРОВ СВИВКИ В НЕСУЩИХ КАНАТАХ ПОДВЕСНЫХ КАНАТНЫХ УСТАНОВОК

И. Н. БЕРЕГОВОЙ

Хмельницкий технологический институт

На подвесных лесотранспортных установках в качестве несущего органа применяют канаты двойной свивки, выносливость которых существенно зависит от напряжений вторичного изгиба, возникающих в элементах каната под колесом грузовой каретки в результате деформации поперечного сечения каната.