

# Устойчивость свободностоящих башенных кранов при внезапном снятии нагрузки

А.А. Зарецкий, докт. техн. наук, профессор

М.В. Колобаев, генеральный директор  
КТИ-155

В мировой практике испытания устойчивости кранов против опрокидывания при внезапном снятии нагрузки не проводятся из-за их опасности, а расчеты на устойчивость при внезапной разгрузке, выполняемые в России и за рубежом, весьма условны. В предлагаемой статье получены теоретические соотношения, выполнение которых обеспечивает устойчивость любого свободно стоящего крана стрелового типа при обрыве груза. Предложена практически удобная и безопасная методика экспериментальной оценки потенциальной энергии, накопленной в упругой системе «кран – основание» при подъеме груза, как критерия устойчивости и угла наклона крана при внезапной разгрузке.

Правила ПБ 10–382–00 [1] ст. 2.1.8 требуют обеспечения устойчивости кранов стрелового типа и кранов-перегрузателей при внезапном снятии нагрузки. На практике же эти краны на такую устойчивость, как правило, не рассчитывают и, тем более, не испытывают. Ростехнадзор на это нарушение Правил обычно внимания не обращает.

Вместе с тем, аварии с кранами, связанные с внезапным снятием нагрузки на крюке, не так уж редки. Так, в работе [2] сообщается, что, по данным Калифорнийского подразделения Администрации Охраны Труда и Здоровья в США (OSHA) только в течение двух лет (1997–1999 г.г.) произошло 158 аварий с кранами, последствиями которых были либо смертельный исход, либо тяжелые травмы операторов и другого обслуживающего персонала. Из общего числа аварий более 80% произошло с кранами стрелового типа. Причиной 43 аварий было признано падение груза. 35 аварий было связано с потерей устойчивости. Парки кранов и их аварийность в России и США, как показывает анализ, имеют много общего. Поэтому можно ожидать, что в России имеет место похожая картина с частотой аварий, вызванных падением груза. Следовательно, Ростехнадзор должен неукоснительно требовать исполнения указанной статьи Правил, а изготовители кранов – проводить расчеты и испытания на устойчивость против опрокидывания при

внезапном снятии нагрузки.

В мировой практике испытания на устойчивость против опрокидывания при внезапном снятии нагрузки, не проводятся, по-видимому, из-за опасности, возникающей при проведении испытаний. Безопасную методику испытаний невозможно разработать без соответствующей теории.

Расчеты на устойчивость при внезапной разгрузке, выполняемые в России [3] и за рубежом [4, 5, 6,], весьма условны. Так, для стреловых кранов принимают расчетную нагрузку, равную  $0,2Q$ , направленную вверх и приложенную к концу стрелы [6], для башенных кранов принимают нагрузку  $0,3Q$  [3, 4, 5], где  $Q$  – грузоподъемность крана. Эта методика расчета теоретически не обоснована, и, как свидетельствуют опытные данные, приведенные выше, значения расчетных нагрузок в большом числе случаев не обеспечивают устойчивости. В предлагаемой статье получены теоретические соотношения, выполнение которых обеспечивает устойчивость любого свободно стоящего крана стрелового типа при обрыве груза.

На рис. 1 приведена расчетная схема проверки устойчивости крана стрелового типа при внезапной разгрузке. Разгрузка может быть полной или частичной. В первом случае имеет место падение груза, например, при обрыве стропов. Второй случай встречается при применении грузозахватных

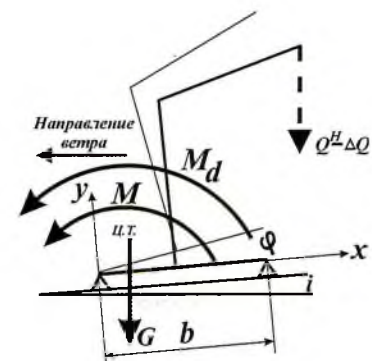


Рис. 1 Расчетная схема крана на устойчивость при внезапной разгрузке

устройств, допускающих быструю разгрузку, например, грейферы, магниты, саморазгружающиеся бабды и т.п. В первом случае  $\Delta Q = Q^H$ , во втором –  $\Delta Q < Q^H$ , где  $\Delta Q$  – вес поднимаемого полезного груза. Наибольшая опасность опрокидывания возникает при полной разгрузке, т.е. при падении груза.

Приведенная на рис.1 схема отражает нелинейную динамическую систему с одной степенью свободы. Предполагается, что кран установлен на жестком основании, с допустимым наклоном  $i$ . Ветер действует в сторону наклона основания и вероятного опрокидывания. Эти предположения соответствуют общепринятым условиям расчета крана на собственную устойчивость. Описание движения системы с помощью дифференциальных уравнений трудностей не представляет. Однако получение аналитического ре-

шения этих уравнений в общем виде затруднительно. Более содержательным для практики оказывается другой, так называемый энергетический подход, рассматриваемый ниже.

После внезапной разгрузки (падения груза или его части) следует ожидать опрокидывания крана назад. Оно происходит за счет высвобождения (соответственно полностью или частично) потенциальной энергии, накопленной в упругих элементах крана (металлической конструкции, канатах и др.) за счет их деформации при подъеме груза. Быстро высвобождаясь, эта энергия производит некоторую работу по опрокидыванию крана назад. Если движение назад завершается, не достигнув положения неустойчивого равновесия, то кран совершает несколько циклов затухающих колебаний и останавливается в положении устойчивого равновесия. В противном случае кран опрокидывается.

Условие устойчивости можно записать в следующем виде:

$$P_0 + A + P_Q \leq P_{Н.Р.}, \quad (1)$$

где:  $P_0$  – потенциальная энергия системы в состоянии покоя (устойчивого равновесия);

$P_Q$  – потенциальная энергия системы, высвобождаемая из упругой системы крана при внезапном уменьшении груза на крюке на величину  $\Delta Q$ ;

$P_{Н.Р.}$  – потенциальная энергия системы в состоянии неустойчивого равновесия;

$A$  – работа внешних сил при повороте крана на угол из состояния покоя до состояния неустойчивого равновесия.

Значения  $P_0$  и  $P_{Н.Р.}$  могут быть вы-

числены по следующей формуле:

$$P = G \cdot (y \cdot \cos \varphi + x \cdot \sin \varphi), \quad (2)$$

где:  $\varphi = \varphi_0 = 0$ ,

угол наклона крана в состоянии покоя (устойчивого равновесия), принимаемый за точку отсчета;

$\varphi = \varphi_{Н.Р.}$ , угол наклона крана в состоянии неустойчивого равновесия;

$G$  – вес крана;

$x, y$  – координаты центра тяжести крана в системе координат  $xOy$ .

Работа внешних сил, совершаемая при повороте крана на угол от состояния устойчивого равновесия (покоя) до состояния неустойчивого равновесия, определяется по выражению

$$A = (M_w + S \cdot i) \varphi_{Н.Р.} \quad (3)$$

$S = G \cdot y$  – статический момент веса крана.

$$\varphi_{Н.Р.} = \frac{M}{S} \quad (4)$$

$M = G \cdot (x - y \cdot i) - M_w$  – суммарный момент статических нагрузок, действующих на кран в положении покоя.

Таким образом, определены все величины, входящие в энергетическое условие устойчивости. Поэтому поставленную задачу в принципе можно считать решенной.

Однако полученное решение неудобно для практического применения, т.к. инженеры привыкли оценивать устойчивость крана, сопоставляя опрокидывающий и удерживающий статические и динамические моменты.

Необходимое соотношение получим из энергетического условия (1), подставив в него формулы (2), (3) и (4),

положив  $\cos \varphi \approx 1 - \frac{\varphi^2}{2}$ ,  $\sin \varphi \approx \varphi$ ,

и проведя несложные преобразования, в следующем виде:

$$M^2 - 2 \cdot S \cdot P_Q \geq 0, \quad (5)$$

Его можно переписать как

$$M \geq \pm \sqrt{2 \cdot S \cdot P_Q}, \quad (6)$$

Для доказательства устойчивости практический смысл имеет только одно, положительное значение  $M$ . Имея это в виду, представим окончательно расчетное соотношение для проверки устойчивости следующим образом:

$$M_y \geq M_o, \quad (7)$$

где  $M_y = G \cdot (x - y \cdot i)$  – расчетный удерживающий момент,

$M_o = M_w + M_\delta$  – расчетный опрокидывающий момент,

$M_\delta = \sqrt{2 \cdot S \cdot P_Q}$  – статический эквивалент момента от динамических нагрузок, возникающих при внезапном снятии нагрузки. Соотношение (7) в целом является алгебраическим условием устойчивости, эквивалентным энергетическому условию устойчивости (1).

Важно отметить, что значение  $M_o$  при необходимости можно уменьшить, понижая центр тяжести крана, т.е. уменьшая  $S$ .

Входящая в формулу для  $M_o$  вели-

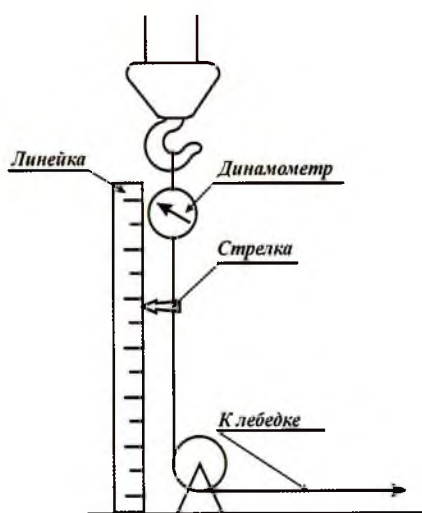


Рис.2. 1-я схема измерения z

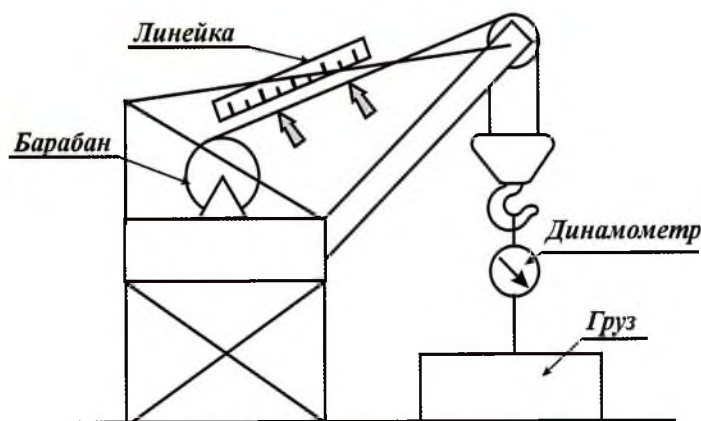


Рис.3. 2-я схема измерения z

чина  $\Pi_Q$  определяется по формуле:

$$\Pi_Q = \frac{Q \cdot z}{2},$$

где  $Q$  – вес поднимаемого груза,  $z$  – вертикальное перемещение крюка под действием силы  $Q$ , определяемое общими методами строительной механики.

Вернемся к вопросу испытания на устойчивость против опрокидывания при внезапном снятии нагрузки. Полученные теоретические оценки являются экстремальными. Поэтому для проверки устойчивости достаточно определить экспериментально значение потенциальной энергии, накапливаемой в упругой системе крана при подъеме груза. Заканчивается проверка расчетом.

Определение  $\Pi_Q$  сводится к измерению перемещения  $z$ . На практике могут быть использованы две схемы измерения (рис. 2 и рис. 3).

Согласно первой схеме, усилие, создаваемое лебедкой, укрепленной вне крана, прикладывается к крюку через динамометр, с помощью которого измеряют нагрузку на крюке. Перемещение крюка измеряют с помощью стрелки, укрепленной на канате, и линейки, как показано на рис. 2. Рекомендуется измерения делать через каждые 0,1...0,2 грузоподъемности. По результатам измерений строят график зависимости перемещения крюка от нагрузки. Он должен быть примерно линейным. Измерения выполняют трижды, как при нарастании нагрузки, так и при ее уменьшении. Окончательно перемещения крюка принимают как среднее по трем измерениям.

Согласно второй схеме, усилие создается с помощью лебедки подъема груза. В результате деформаций элементов конструкции крана и основания, определяющих перемещение крюка, по мере увеличения или уменьшения усилия в канатах, соединяющих крюк крана с грузом, лежащим на грунте, барабан лебедки должен произвести дополнительные обороты. Для измерения  $z$  необходимо либо измерить число оборотов  $n$ , что позволит определить путь  $S$ , проходимый некоторой точкой ветви каната, идущей на барабан. Либо с помощью линейки непосредственно измерить путь, отмеченной точкой на ветви каната при изменении нагрузки на крюке, контролируемой с помощью динамометра, как показано на

схеме (рис.3). Как и в предыдущем случае, измерения следует производить трижды при увеличении и уменьшении нагрузки на крюке. Во время измерений она не должна быть меньше 0,1 грузоподъемности крана. Перемещение  $z = S / m$ , где  $m$  кратность грузового полиспаста.

В обоих случаях измерения  $z$  длина грузового полиспаста должна быть наибольшей.

В некоторых случаях нельзя допускать большого наклона крана. Например, для рельсового башенного крана, чтобы избежать схода с рельс, высота подъема переднего колеса, противоположного опасному направлению опрокидывания (на схеме рис.1 оно находится справа), не должна превышать высоты реборды. В этом случае наряду с проверкой устойчивости следует проверить условие:

$$\varphi_a \geq \varphi_{max}, \quad (8)$$

где  $\varphi_a$  – допускаемый угол наклона крана, определяемый отношением допускаемой высоты отрыва опоры  $h$  к расстоянию между опорами  $b$ ;  $\varphi_{max}$  – максимальный угол наклона.

Для определения  $\varphi_{max}$  рассмотрим уравнение:

$$\Pi_0 + A + \Pi_Q = \Pi_{max}, \quad (9)$$

где  $\Pi_{max}$  – потенциальная энергия положения крана при наклоне на угол  $\varphi_{max}$ . Подставив в него формулы (2), (3), (4) и положив в них  $\varphi_{max}$  вместо  $\varphi$  и  $\varphi_{н.р.}$ , после преобразований получим следующее квадратное уравнение относительно  $\varphi_{max}$ :

$$S \cdot \frac{\varphi_{max}^2}{2} - M \cdot \varphi_{max} + \Pi_Q = 0. \quad (10)$$

Решение этого уравнения относительно  $\varphi_{max}$  имеет вид

$$\varphi_{max} = \frac{M - \sqrt{M^2 - 2 \cdot S \cdot \Pi_Q}}{S}, \quad (11)$$

Второе решение уравнения (10) со знаком «+» перед радикалом противоречит здравому смыслу, и поэтому не рассматривается.

Решение (11) показывает, что при  $\Pi_Q = 0$ ,  $\varphi_{max} = 0$  также. Если  $\Pi_Q > 0$ , то и  $\varphi_{max} > 0$ .

Таким образом, при обрыве груза всегда имеет место отрыв колес от рельса. За счет изменения координат частей крана достигается такое состояние, чтобы значение  $M$  обеспечивало угол наклона крана при этом отрыве не более заданного.

## Выводы

1. Основной характеристикой устойчивости свободстоящего крана при внезапной разгрузке (падении груза) является потенциальная энергия, накопленная в упругой системе крана при подъеме груза. Ее действие можно уменьшить, понижая центр тяжести крана.

2. Предложена теория, на основе которой получены аналитические зависимости, позволяющие проверить расчетом устойчивость свободстоящего крана при внезапной разгрузке и определить угол наклона крана при обрыве груза. Динамический опрокидывающий момент представлен в виде статического эквивалента.

3. Экспериментальная проверка устойчивости и угла наклона крана при внезапной разгрузке сводится к оценке фактической потенциальной энергии, накопленной в упругой системе «кран – основание» при подъеме груза.

4. Предложена практически удобная и безопасная методика экспериментальной оценки потенциальной энергии, накопленной в упругой системе «кран – основание» при подъеме груза.

## Литература

1. ПБ 10–382–00 Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов.
2. California accident report shows that falling loads are the greatest danger. Cranes Today, July, 2000.
3. РД 22–166–86 Краны башенные строительные. Нормы расчета.
4. ISO 4304: 1987 Cranes other than mobile and floating cranes – General requirements for stability.
5. ISO 12485: 1998 Tower cranes – Stability requirements.
6. DIN 15019: 1979 Teil 1 Krane. Standsicherheit für alle Krane ausser gleislosen Fahrzeugkranen und ausser Schwimmkranen.
7. DIN 15019: 1979 Teil 2 Krane. Standsicherheit für gleislosen Krane Prufbelastung und Berechnung.
8. РД 22–145–85 Краны стреловые самоходные. Нормы расчета устойчивости против опрокидывания. ■