

УДК 621.874.04

Поликарпов Ю. В.

**ДВИЖЕНИЕ ЧЕТЫРЕХКОЛЕСНОГО КРАНА НА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОЛЕСАХ «ВПЕРЕД» И «НАЗАД» В ПРЕДЕЛАХ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ**

Одним из важных вопросов в решении проблемы повышения стойкости колес кранов мостового типа, передвигающихся по приближенно прямолинейному рельсовому пути на цилиндрических колесах, является вопрос об определении продолжительности и интенсивности контактного взаимодействия реборд и рельсов в зависимости от установочных перекосов колес. Этот вопрос напрямую связан с закономерностями движения крана в пределах рабочей зоны.

В работе [1] было показано, что в свободном движении (при отсутствии контакта реборд с рельсами) кран, плоскости качения колес которого не строго параллельны между собой (реальный кран), при неизменных и одинаковых для всех колес условиях на контакте перемещается по траектории близкой к окружности. При этом в качестве меры, определяющей кривизну траектории, было предложено считать величину, названную «эффективный угол перекоса колес». Эта величина определялась из выражения:

$$\beta_3 = (\beta_1 + \beta_2) - (\beta_3 + \beta_4),$$

где  $\beta_3$  – эффективный угол перекоса колес;

$\beta_i$  – угол перекоса  $i$ -го колеса.

Дальнейшее рассмотрение этого вопроса в работах [2–4] показало, что величины углов перекоса колес, измеренные при выверке колес относительно некоторой базы, в общем случае есть результат сложения собственно перекосов колес относительно оси крана, и перекоса крана в целом относительно базы измерений, в качестве которой целесообразно принять направление пути. Осью крана было предложено считать направление, относительно которого сумма углов перекоса всех четырех колес равна нулю. В таком случае угол перекоса крана в целом относительно базы измерений определяется как четвертая часть суммы углов перекоса колес по результатам выверки. Это угол, на который необходимо развернуть кран, чтобы сумма углов перекоса стала равной нулю.

Далее было введено понятие приведенного угла перекоса колеса. Это угол перекоса колеса относительно оси крана. Его величина не зависит от направления базы измерений. Кроме того, сумма любых двух приведенных углов перекоса колес равна сумме двух других приведенных углов перекоса колес, взятой с обратным знаком.

В работе [3] была выявлена аналогия между реальным краном и кольцевым мостовым краном, который специально проектируется так, чтобы обеспечить движение по рельсовому пути, уложенному по окружности. Оси его колес лежат в радиальных плоскостях, проведенных из центра этой окружности, причем оси колес, установленных на одной оси крана, лежат в одной радиальной плоскости.

Оси колес реального крана не лежат в упомянутых радиальных плоскостях, однако с достаточной степенью точности можно считать, что это условие выполняется «в среднем» для каждой пары колес одной оси. Это дает основания принять в качестве меры кривизны траектории среднее значение приведенного угла перекоса колес, расположенных на одной оси крана (СУПК), вместо принятого ранее «эффективного угла перекоса колес». Такая замена позволяет перейти к величине, сопоставимой с требованиями стандарта [5] по точности установки колес. По сути, регламентируемая стандартом величина есть не что иное, как удвоенная величина СУПК, т. е. не перекос колес относительно оси крана, а взаимный их перекос. Если стандарт ограничивает относительный перекос колес величиной 0,0006 рад, то СУПК не должен превышать 0,0003 рад.

Отдельные этапы движения крана по наперед заданному прямолинейному участку рельсов были рассмотрены в работе [6]. Отправной точкой движения считалось исходное положение, характеризующееся наличием боковых зазоров между ребрами всех колес и рельсами. Такое исходное положение крана гарантировано только после его монтажа, или смены колес с последующей их выверкой. В общем случае исходное положение каждого последующего цикла движения крана определяется результатами его движения «назад» в предыдущем цикле, а кривизна рельсового пути в плане оказывает существенное влияние на этот процесс.

Целью данной работы является определение закономерностей движения четырехколесного мостового крана как «вперед», так и «назад» в пределах рабочей зоны и его положения в конечных точках этого движения.

Более детальное рассмотрение исходного положения крана показывает, что кроме зазоров необходимо учесть его местоположение на траектории свободного движения. В этом плане можно выделить три существенно различающихся варианта: кран на восходящем участке траектории; задние колеса на восходящем, а передние на нисходящем участке траектории; кран на нисходящем участке траектории. При переходе колес с восходящего на нисходящий участок траектории средний угол их перекоса относительно направления пути меняет знак. Первые два варианта исходного положения крана схематически представлены на рис. 1.

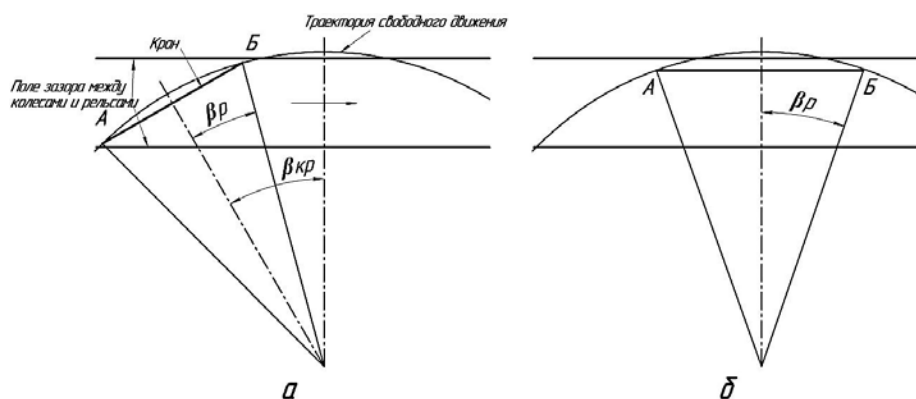


Рис. 1. Исходные положения крана:

а – кран на восходящем участке траектории; б – передние колеса на нисходящей, задние – на восходящей ветви траектории;  $\beta_p$  – среднее значение приведенного угла перекоса колес;  $\beta_{kp}$  – угол перекоса крана относительно направления пути

На рис. 1 колеса, расположенные на одной оси, условно совмещены, и кран представлен отрезком  $AB$ , который помещен в поле зазора между ребрами и рельсами. В точках  $A$  и  $B$  расположены колеса крана. Границы поля зазора обозначены двумя горизонтальными линиями. Через концы отрезка  $AB$  (колеса) проходит кривая траектории свободного движения крана – окружность. Плоскости качения колес касательны к окружности. Углы наклона плоскостей качения колес к направлению пути в каждый момент времени равны сумме СУПК и угла перекоса крана относительно пути, которые на рис. 1 обозначены  $\beta_p$  и  $\beta_{kp}$  соответственно. На рис. 1, а и 1, б принято, что траектория пересекает граничную линию поля зазора, и в процессе движения вдоль нее ребра одного из передних колес вступит в контакт с рельсом.

В соответствии с существующими представлениями зазоры между ребрами колес и рельсами назначаются для компенсации допусков на колею крана в цеху, на искривление рельсов в плане, на температурные изменения длины моста. Так как эти рекомендации предусматривают компенсацию предельных значений упомянутых отклонений, то в действительности практически всегда имеются остаточные зазоры.

На практике начальные зазоры, измеренные в одном исследовании [7, с. 30] составляли от 7 до 27 мм, во втором [7, с. 126] по левым ребордам четырех колес – 2 мм, 7 мм, 3 мм, 8 мм. При таких малых зазорах контакт реборды с рельсом на восходящем участке траектории весьма вероятен.

Предположим, кран начинает двигаться из положения, изображенного на рис. 1, а и одна из реборд передних колес вступает в контакт с рельсом. На этом свободное движение крана заканчивается.

Из рис. 1, а видно, что на восходящем участке траектории в контакт с рельсом войдет одна из ближних к центру траектории реборд одного, или второго колеса. Какая именно реборда – это зависит от соотношения между пролетом колес данной оси (расстоянием между их центрами) и пролетом рельсового пути, рис. 2.

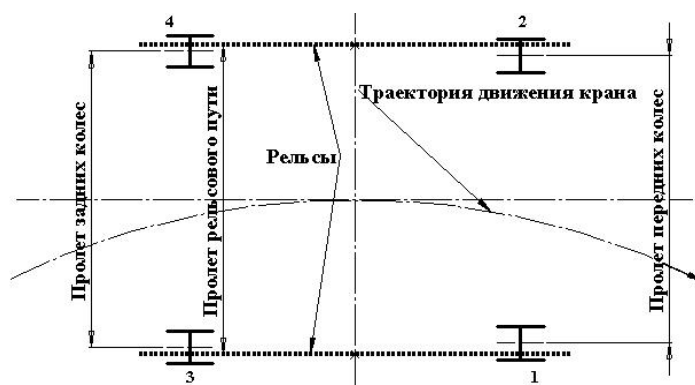


Рис. 2. Зазоры между колесами и рельсами при пролете колес меньшем, чем пролет рельсов

Если пролет колес меньше пролета рельсов, как это представлено на рис. 2, то на восходящем участке траектории в контакт с рельсом вступит реборда ближнего к центру траектории колеса, а в противном случае – реборда дальнего колеса. При изменении пролета рельсов по длине пути крана реборды могут вступать в контакт с рельсами попеременно. По причине ускоренного износа более интенсивно вступающей в контакт реборды, в процессе работы крана положение центров колес смещается в ту или иную сторону, что изменяет соотношение между пролетами колес и рельсов. Это приводит к тому, что скорость износа реборд выравнивается. При идеально ровных рельсах после приработки (выравнивания пролетов) обе реборды вступали бы в контакт с рельсами одновременно. Этим определяется то, что, как правило, изнашиваются оба колеса каждой оси.

В дальнейшем движении реборда переднего колеса скользит вдоль рельса, оставаясь прижатой к нему. Вследствие этого перекосы передних колес перестают оказывать влияние на траекторию движения крана, и под действием перекосов задних колес он начинает поворачиваться относительно точки контакта в отрицательном направлении, т. е. выравнивается относительно направления пути. При этом угол перекоса задних колес относительно направления пути уменьшается. Если не учитывать силу трения прижатой к рельсу реборды и ограничивающего действия рельсов, то в пределе величина этого угла становится равной нулю, а угол перекоса крана изменяет знак. С учетом силы трения результат зависит от того, реборда какого именно из передних колес вступила в контакт с рельсом [6]. Если в контакт с рельсом вступила реборда левого по направлению движения колеса, изменение угла перекоса крана становится менее значительным, и более значительным в противном случае. Учитывая то, что из-за погрешностей укладки рельсов их пролет имеет разные значения по длине пути, влиянием силы трения при скольжении реборды вдоль рельса пренебрегаем.

Вместе с краном при его повороте изменяет свое положение и потенциальная траектория его свободного движения.

Движение крана на участке контакта реборд передних колес с рельсами изображено на рис. 3, а. Здесь пунктиром показано угловое положение крана и потенциальной траектории движения в начальный момент контакта реборды с рельсом (точки контакта реборды и рельса условно совмещены).

Когда угол поворота крана станет таким, что величина угла его перекоса, не меняя знак, по абсолютной величине уменьшится до СУПК передней оси, то направление касательной к траектории свободного движения в точке контакта совпадет с направлением рельсового пути и станет возможным движение крана по траектории свободного движения. Контакт соответствующей реборды с рельсом будет разорван. Передние колеса пройдут точку разделения восходящей и нисходящей ветвей траектории, и кран окажется в положении рис. 1, б.

Из положения рис. 1, б свободное движение крана будет продолжаться до тех пор, пока в контакт с рельсом не войдет реборда либо заднего, либо переднего колеса. Можно было бы считать, что если передние колеса прошли восходящий участок, то и задние тоже пройдут, если бы не разница в пролетах передних и задних колес. По данным работы [7, с. 30] их величины по результатам измерения на конкретном кране различаются на 10 мм. Поэтому данный вопрос требует рассмотрения.

Прохождение краном участка контакта с рельсами реборд задних колес схематически представлено на рис. 3, б.

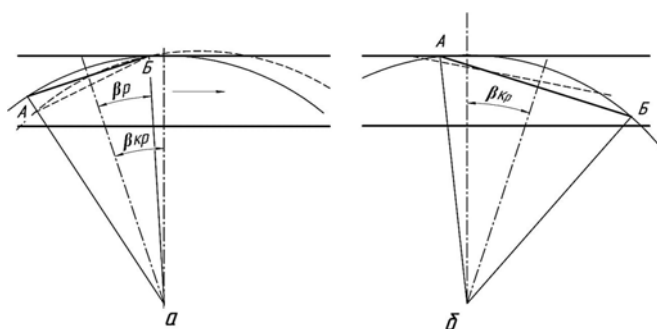


Рис. 3. Контакт с рельсом реборд переднего и заднего колес на восходящей ветви траектории:

а – контакт с рельсом реборды переднего колеса; б – контакт с рельсом реборды заднего колеса

Как и в предыдущем случае, центром поворота крана будет точка контакта реборды с рельсом. Пунктирный отрезок на рис. 3, б показывает то угловое положение, которое кран занимал в момент начала контакта. Если в тот момент, когда задние колеса крана будут находиться в наивысшей точке траектории, реборды передних колес еще не вступят в контакт с рельсами, дальнейшее движение крана будет свободным.

Условие разрыва контакта реборд задних колес с рельсами можно записать в виде:

$$\delta \geq B\beta_p, \quad (1)$$

где  $\delta$  – минимальный суммарный боковой зазор между накрест лежащими ребордами передних и задних колес и рельсами в текущем положении крана;

$B$  – база крана;

$\beta_p$  – среднее значение приведенного угла перекоса колес одной оси крана [3].

К примеру, при среднем значении приведенного перекоса колес крана  $\pm 0,00225$  рад и его базе 5 м величина  $\delta$  должна быть не менее 11 мм. Очевидно, что при приведенных выше значениях зазоров оба варианта дальнейшего движения крана примерно равновероятны. Если же приведенный перекоса колес не превышает пределы, определенные на основе стандарта, т. е.  $\pm 0,0003$  рад, то достаточно зазора в 1,5 мм и свободное движение на этом участке можно считать наиболее вероятным.

Особенность движения крана при переходе колес с восходящей на нисходящую ветвь траектории состоит в том, что в верхней точке траектории свободного движения средний приведенный перекося соответствующих колес относительно направления рельсового пути должен быть равен нулю, до этой точки – положителен, а после нее – отрицателен.

Если величина зазора  $\delta$  оказалась недостаточной для разрыва контакта с рельсами реборды задних колес, то в этом положении, скользя по рельсам ребордами и передних, и задних колес, кран будет двигаться дальше. Это движение может продолжаться до конца рабочего участка, или до тех пор, пока зазор не возрастет настолько, что станет возможным разрыв контакта с рельсами реборд задних колес. При значительной кривизне рельсов в плане контакт может разрываться и вновь восстанавливаться с некоторым запаздыванием по отношению к изменению зазоров между рельсами и ребордами.

Если же величина зазора  $\delta$  достаточна для разрыва контакта с рельсом реборды задних колес, то продолжится движение по окружности, которое закончится контактом с рельсом реборды передних колес. В процессе дальнейшего движения крана вдоль абсолютно прямолинейного рельса угол перекося крана приближается к установившемуся значению [6]. Если пренебречь трением, то установившееся значение угла перекося крана равно  $\beta_p$ , средняя плоскость качения задних колес параллельна направляющему рельсу, а средняя плоскости качения передних колес образует с ним угол  $2\beta_p$ .

Таким образом, в конечной точке пути при движении крана «вперед» после монтажа или ремонта возможны два варианта его расположения относительно рельс:

- реборды передних колес контактируют с одним из рельсов, а задних – с другим;
- реборды передних колес контактируют с рельсом, задние колеса не вступают в контакт с рельсом, а средняя плоскость их качения примерно параллельна тому рельсу, вдоль которого в текущий момент времени скользит реборда переднего колеса.

Условие, разграничивающее эти варианты, соответствует неравенству (1), выполнение которого необходимо проверять в крайнем положении крана. Если оно не выполнено, то имеет место первый вариант, в противном случае – второй.

При обоих вариантах расположения крана в конечной точке его движения «вперед», отсутствуют ограничения для его свободного движения «назад». Поэтому движение крана «назад», по сути, повторит его движение «вперед» с той разницей, что колеса, которые при движении «вперед» были задними, станут передними. Из этого следует, что: как правило, все колеса будут изнашиваться примерно одинаково; угол перекося крана в позиции выверки не оказывает существенного влияния на его дальнейшее движение и высказанное в работе [2] предложение о выверке колес в середине рабочей зоны ошибочно.

Так как углы перекося колес вычислены относительно оси крана, то повороты крана относительно направления пути приводят к тому, что один из них возрастает, а другой соответственно уменьшается. Их разность, которая характеризует суммарную интенсивность взаимодействия колес с идеально прямыми рельсами или относительную скорость упругого скольжения остается неизменной на всем протяжении контакта, и равной  $2\beta_p$ .

Кривизна рельсов в плане вносит свои коррективы в виде дополнительной знакопеременной нагрузки. Ее величина по экспериментальным данным работы [7, с. 34], соответствующая интерпретация которых дана в работе [8], довольно значительна. Знакопеременный характер этой нагрузки позволяет, в первом приближении, пренебречь ее влиянием на интенсивность износа колес. Тем не менее, необходимо обратить внимание на нежелательное явление, которое может произойти в результате суммирования эффектов перекося колес и кривизны рельсов – выход за пределы зоны упругого скольжения. В таком случае возможен ускоренный износ не только колесных реборд, но и дорожки катания.

Максимальная относительная скорость упругого скольжения колес относительно рельсов составляет 0,0052 [7, с. 86]. При ее превышении будет иметь место неупругое скольжение со смещением контактирующих поверхностей. Для оценки относительной скорости скольжения колес, вызванной кривизной рельсов, воспользуемся, диаграммами отклонений рельсового пути от прямой линии [7, с. 124], из которых видно, что отклонение от прямолинейности достигает

7 мм/м. Суммуясь со скольжением, вызванным перекосом колес в пределах стандарта, величина относительного скольжения достигнет 0,0076, значительно превысив предел упругого скольжения. Если учесть реальные перекосы колес, то можно предположить, что относительные скорости скольжения на некоторых участках достигают 0,01 и более.

На наш взгляд, необходимо в стандарте предусмотреть ограничение погонного прироста отклонения рельсов от прямой линии величиной 3–4 мм/м.

### ВЫВОДЫ

При движении в каждом направлении по прямолинейным и параллельным рельсам начальную часть пути реальный кран проходит по траектории свободного движения. Основную часть пути кран проходит при контакте реборд с рельсами.

На участках установившегося движения (при неизменном угле перекоса крана относительно пути), а также в конечных точках пути он может занимать одно из двух положений: с рельсом контактируют только реборды передних по ходу движения колес; с рельсами контактируют накрест лежащие реборды передних и задних колес. Движение крана «назад» является зеркальным отображением его движения «вперед». Каждый новый цикл движения повторяет предыдущий.

Контакт с рельсами реборд только передних колес крана имеет место тогда, когда зазоры между ребордами и рельсами не препятствуют его перекосу относительно пути на угол, равный среднему приведенному углу перекоса колес. Угол, образуемый плоскостью качения контактирующего колеса с рельсом (относительная скорость упругого скольжения), равен удвоенной величине среднего приведенного угла перекоса колес.

При контакте с рельсами реборд колес обеих осей суммарная относительная скорость их поперечного упругого скольжения относительно рельс равна удвоенной величине среднего приведенного угла перекоса колес.

Погрешности расположения рельсов в плане при сужении колеи приводят к увеличению, а при ее расширении к уменьшению скорости упругого скольжения. При отсутствии ограничений на погонную кривизну рельсов в плане это приводит к эпизодическому выходу скольжения колес за пределы упругой зоны.

Угол перекоса крана в позиции выверки не оказывает существенного влияния на его дальнейшее движение.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поликарпов Ю. В. Кинематика движения четырехколесной ходовой тележки грузоподъемного крана / Ю. В. Поликарпов // *Подъемно-транспортная техника*. – 2003. – № 2. – С. 78–82.
2. Поликарпов Ю. В. Выверка колес грузоподъемных кранов и назначение боковых зазоров в паре колесо – рельс [Электронный ресурс] / Ю. В. Поликарпов // *Научный Вестник ДГМА : сб. науч. трудов*. – 2009. – № 2 (5E). – С. 129–134. – Режим доступа: [http://archive.nbuv.gov.ua/e-journals/VDDMA/2009\\_2/article/09PJVBPV.pdf](http://archive.nbuv.gov.ua/e-journals/VDDMA/2009_2/article/09PJVBPV.pdf).
3. Поликарпов Ю. В. Обоснование выбора математической модели движения грузоподъемного крана по рельсовому пути / Ю. В. Поликарпов, Ю. Н. Диденко // *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. праць*. – Краматорськ : ДДМА, 2011. – № 4 (25). – С. 240–244.
4. Поликарпов Ю. В. Анализ некоторых практических рекомендаций по повышению стойкости колес мостовых кранов / Ю. В. Поликарпов // *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. праць*. – Краматорськ : ДДМА, 2012. – № 2 (27). – С. 164–167.
5. ОСТ 27584 – 88. Краны мостовые и козловые электрические. Общие технические условия. – Введ. 01.01.90. – М. : Изд-во стандартов, 1980. – 24 с.
6. Поликарпов Ю. В. Кинематика движения крана на участке взаимодействия реборд с рельсами / Ю. В. Поликарпов // *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. праць*. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – № 1 (11). – С. 145–150.
7. Лобов Н. А. Динамика передвижения кранов по рельсовому пути / Н. А. Лобов. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 232 с.
8. Поликарпов Ю. В. Анализ экспериментальных данных о движении грузоподъемных кранов на цилиндрических колесах с раздельным приводом с позиций кинематики / Ю. В. Поликарпов // *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. праць*. – Краматорськ : ДДМА, 2010. – № 3 (20). – С. 208–213.