

следами снега и т.п., т.е. при наличии слабой смазки, когда $\mu = 0,1$, работа недопустима. При $\mu = 0,18$ коэффициенты запаса равны от 1,15 и 1,21 до 1,4 и 1,35 для захватов грузоподъемностью 20 т и 25 т соответственно, и в отдельных случаях, когда $K > 1,25$, захваты можно эксплуатировать. Но это неудобно, поскольку для других рулонов, когда $K < 1,25$, тот же захват применить нельзя. Для надёжной работы с $K \geq 1,5$ коэффициент трения должен быть $\mu > 0,24$. Поэтому рекомендуется перейти на захваты с рифлёными башмаками, для которых коэффициент трения $\mu > 0,3$.

Выводы. Подробно рассмотрен процесс взятия захватом груза, включая возможные его проскальзывания в процессе подъема, в отличие от ранее выполненного исследования, где рассматривались условия равновесия уже поднятого груза. Различия результатов в обоих вариантах трения невелики.

Рассмотрены 16 сочетаний варьируемых параметров рулонов для захватов 20 т и 18 – для захватов 25 т, охватывающие всю область их возможных значений. Как следует из расчётов этих вариантов, если коэффициент трения $\mu = 0,1$ (наличие слабой смазки ввиду влияния льда, снега или дождя), то подъём любых рулонов недопустим (коэффициент запаса $K < 1$). Необходимо предохранять рулоны от попадания снега и льда зимой, влаги от дождя и смазочных составов летом. Перед эксплуатацией захвата обязателен осмотр рабочих поверхностей и приведение их в работоспособное состояние.

Коэффициент запаса захвата K принимается равным отношению действительного коэффициента трения к минимально необходимому. Действительным считается либо справочное, либо непосредственно измеренное значение.

При подъёме грузов всухую коэффициент трения в захвате равен $\mu = 0,18$. Коэффициент запаса при этом $1 < K < [K] = 1,5$. Подъём рулонов при $K \geq 1,25$ возможен, однако в реальных условиях эксплуатации ряд трудно контролируемых факторов – износ и трение в шарнирах, зазоры, деформации, уменьшающие силу прижатия башмаков и др., ухудшают работу захвата и часто делают невозможным взятие груза, которое по расчёту возможно, т.е. работа с таким захватом является ненадёжной.

Применение в захвате рифлёных стальных башмаков вместо гладких увеличивает коэффициент трения с $\mu = 0,18$ до $\mu = 0,3...0,4$. При $\mu = 0,3$ в рассмотренных вариантах параметров коэффициент запаса превышает норму, минимальная величина его равна $K = 1,9$. Рифленые башмаки гарантируют надёжную работу захвата.

Литература

1. ГОСТ 14918-80. Сталь тонколистовая оцинкованная с непрерывных линий. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2017. – 7 с.

2. РД 31.45.93-82. Устройства грузозахватные крановые. Типовые расчёты. Методика. – М.: В/О «Мортехинформ-реклама», 1984. – 152 с.

3. Александров М. П. Подъемно-транспортные машины: учеб. для машиностроительных спец. вузов. — 6-е изд., перераб. – М.: Высш. шк., 1985. – 520 с., ил.

В.А. Потапов. Тел. 495-645-34-40.

E-mail: potapov@itc-kros.ru

В.Л. Лифшиц. E-mail: v.lifshitz@mail.ru



УДК 620.86

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ КРАНОВЫХ ХОДОВЫХ КОЛЕС С УЧЕТОМ ОТКЛОНЕНИЙ ПУТЕЙ ОТ ПРОЕКТНОГО ПОЛОЖЕНИЯ

Павел Владимирович ВИТЧУК, канд. техн. наук, доцент,
Александр Анатольевич ШУБИН, канд. техн. наук,
заведующий кафедрой

Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана

Виталий Юрьевич Анцев, д-р техн. наук, профессор,
заведующий кафедрой

Тульский государственный университет

Константин Юрьевич КРЫЛОВ, эксперт

ООО «Региональный инженерно-технический центр»

Разработана математическая модель процесса контактирования рельса и ходового колеса в виде вероятности наезда его реборды на головку рель-

са, зависящей от траектории движения крана и сужения/расширения колеи; составлены уравнения для расчета износа поверхности качения и реборды колеса. Модель учитывает монтажный перекос колес, наклон колеса в вертикальной плоскости за счет разности отметок головок рельсов в поперечном направлении, а также обратную связь по износу поверхности качения и реборды. Разработаны алгоритмы операторов выбора, позволяющие моделировать положения грузовой тележки и массу поднимаемого краном груза в i -м цикле его работы.

Ключевые слова: дефект, долговечность, износ, испы-

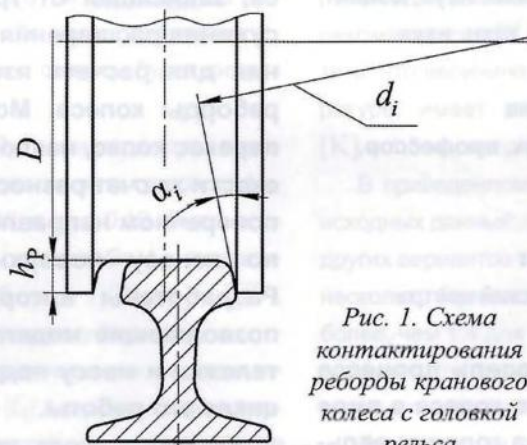
тания, крановое колесо, крановый путь, комплекс, обследование.

Комплексная задача повышения надежности мостовых кранов связана с увеличением долговечности их узлов и деталей. Работы, проведенные ВНИИПТМАШ в 60-70-х годах XX века, выявили крайне низкую долговечность ходовых колес [1], которые до сих пор относятся к числу быстроизнашивающихся крановых деталей. Исследованию их работоспособности и долговечности с целью их повышения посвящено значительное число работ отечественных и зарубежных авторов. Известные методы повышения долговечности можно условно разделить на следующие группы [2-23]:

- расчетные: ее оценка и прогнозирование с определением боковых сил в ребордах;
- конструктивные: изменение профиля поверхности катания и параметров направляющих (рельсов) кранового пути; модернизация колесного узла и механизма передвижения, увеличение жесткости крановой металлоконструкции, изменение способа соединения концевых балок с главной балкой и др.;
- технологические: применение износостойких материалов, совершенствование способов получения заготовки для ходовых колес и термической обработки их поверхности катания, применение автоматической наплавки и др.;
- эксплуатационные: повышение точности установки ходовых колес в колесный узел и его в концевую балку, применение сменных бандажей колес, смазки реборд, контроль за техническим состоянием кранового пути и др.

В наибольшей степени проработанными являются методы, связанные с повышением долговечности поверхности катания, поскольку они лучше поддаются аналитической оценке. Однако по опыту эксплуатации в 90% случаев причиной отказа ходовых колес является износ реборд, возникающий в первую очередь за счет отклонения крановых путей от проектного положения. При этом аналитическое описание механизма изнашивания крановых колес по ребордам, позволяющее получить простое численное решение, пока отсутствует.

В работах Спициной Д.Н., Липатова А.С., Юрина А.Н. [10-16 и др.] разработаны математические модели, связывающие наличие различных дефектов крановых путей со значением боковых сил, действующих на реборды крановых колес. Дальнейшее развитие этих моделей наряду с совершенствованием диагностического обследования крановых путей позволит связать их теку-



щее состояние с долговечностью ходовых колес, прогнозировать ее с учетом выявленных отклонений путей, принимать взвешенные решения об их устранении даже тогда, когда они находятся в пределах допуска, т.е. не считаются дефектом.

Анализ работ [1-9 и др.] позволяет условно разделить влияние отклонений крановых путей от проектного положения на износ поверхности качения ходовых колес и износ их реборд. Условие сохранения работоспособности кранового колеса по износу реборд $U_p \leq [U_p]$, где U_p , $[U_p]$ – текущий износ поверхности реборды колеса и его предельно допустимая величина, которая ВНИИПТМАШ совместно с Узловским машиностроительным заводом была установлена [10] $[U_p] = 0,5B_{НАЧ}$, где $B_{НАЧ}$ – исходная толщина реборды. Если при обследовании крана износ реборды U_{p0} (для нового колеса $U_{p0} = 0$), текущий ее износ за n циклов работы крана после обследования составит

$$U_p = U_{p0} + \sum_{i=1}^n U_{pi}, \quad (1)$$

где U_{pi} – износ за один цикл работы. Согласно [10] он может быть рассчитан

$$U_{pi} = k_{мп} L_{pi} p_{pi} t_{pai} n_{Oi}, \quad (2)$$

где $k_{мп}$ – коэффициент пропорциональности, зависящий от свойств материала колеса; L_{pi} – путь трения реборды за один оборот; p_{pi} – среднее контактное напряжение на реборде колеса за один оборот; t_{pai} – средняя в единицу времени продолжительность контактирования реборды с боковой гранью головки рельса; n_{Oi} – количество оборотов, совершаемых ходовым колесом за i -й цикл работы крана.

Из работы [4] известно, что для крановых колес, изготовленных из сорбитизированных сталей 65Г и 75, коэффициент $k_{мп} \approx 10^{-8} \dots 10^{-9}$ МПа⁻¹. Для колес, изготовленных из других сталей, в [10] рекомендована формула

$$k'_{мп} = k_{мп} [\sigma_{65Г}] / [\sigma'], \quad (3)$$

где $[\sigma_{65Г}]$ и $[\sigma']$ – допускаемые контактные напряжения смятия для стали 65Г и другой стали соответственно.

В соответствии с [1] длина пути трения реборды за цикл работы крана может быть найдена

$$L_{pi} = h_p \arcsin \left(\frac{b_i}{h_p} \right) n_{Oi}, \quad (4)$$

где h_p – высота реборды; b_i – полуширина полосы контакта реборды с головкой рельса за один оборот, которая в соответствии с [2] может быть рассчитана

$$b_i = 0,0073 \sqrt{\frac{P_{горi} d_i \cos \alpha}{h_p}}, \quad (5)$$

где $P_{горi}$ – средняя горизонтальная нагрузка на реборду в i -м цикле; d_i и α – параметры контактирования реборды и головки рельса (рис. 1). В свою

Рис. 1. Схема контактирования реборды кранового колеса с головкой рельса

очередь

$$d_i = \frac{D_i + 0,5h_p}{\sin \alpha} \quad (6)$$

Для неизношенных крановых рельсов типа КР70 $\alpha \leq 10^\circ$, типов КР 80, КР 100, КР 120, КР 140 $\alpha \approx 6^\circ$ [24], для неизношенных железнодорожных рельсов типов Р50, Р65, Р65К, Р75 $\alpha \approx 3^\circ$ [25].

Аналогично формуле (1)

$$d_{i+1} = \frac{(D_i - U_{Ki}) + 0,5h_p}{\sin \alpha} \quad (7)$$

Для расчета контактного напряжения в реборде может быть использована формула [10]:

$$P_{Pi} = \frac{P_{Горpi}}{2b_i l_k} \quad (8)$$

где $l_k = h_p / \cos \alpha$ – длина полоски контакта.

Средняя в единицу времени продолжительность контактирования реборды с боковой гранью головки рельса определяет долю i -го цикла работы крана, в которой он движется с контактом реборды и головки рельса, равную численно вероятности, что зазор a_i между ребордой и головкой рельса будет по каким-то причинам полностью выбран (рис. 2):

$$t_{Pai} = P(a_i \leq 0) \quad (9)$$

Рельс изнашивается гораздо медленнее крановых колес, условно представим его неизнашиваемым в период срока службы одного комплекта колес, тогда

$$a_i = \frac{b_{Pi} - B}{2} \quad (10)$$

где b_{Pi} – расстояние между ребордами в i -м цикле работы крана. При совершении i -го цикла реборда изнашивается на величину U_{Pi} и расстояние между ребордами в каждом последующем цикле будет увеличиваться, т. е.

$$a_{i+1} = \frac{b_{Pi} - B + U_{Pi}}{2} \quad (11)$$

Вероятность события (9) зависит, в первую очередь, от двух других случайных событий – траектории движения крана и сужения/расширения колеи (P_3). Представляя их в виде нормально распределенных величин можно записать формулу (9) с учетом (11) в следующем виде:

$$t_{Pai+1} = 0,5 + \Phi_0 \left[\frac{M_1(T) - M_2(K) - 1/2(b_{Pi} - B + U_{Pi})}{\sqrt{s_1^2 + s_2^2}} \right] \quad (12)$$

где $M_1(T)$ и $M_2(K)$, s_1^2 и s_2^2 – математическое ожидание и дисперсия траектории движения крана и его колеи; Φ_0 – нормированная функция Лапласа. Считая, что расстояние между колесами крана при его движении не изменяется, можно записать $M_1(T) = S$, где S – пролет крана.

Аналізу траектории движения крана посвящено большое количество теоретических и экспериментальных исследований [10, 12-17 и др.]. Опираясь на их результаты в предварительных расчетах можно принять, что среднеквадратическое отклонение траектории движения крана s_1 также

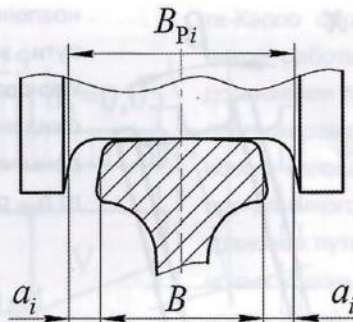


Рис. 2. Зазор между ребордами и головкой рельса

является случайной нормально распределенной величиной с параметрами $M_3(s_1) \approx 4,3 \cdot 10^{-4} S$, $s_3(s_1) \approx 1,3 \cdot 10^{-4} S$.

Параметры $M_2(K)$ и s_2 могут быть установлены по результатам обследования кранового пути, в результате которого получают отклонения в плане его ветвей относительно прямых линий. Тогда математическое ожидание и дисперсия колеи крана могут быть найдены через разницу отклонений левого $\delta_{лк}$ и правого $\delta_{пк}$ рельса соответственно:

$$M_2(K) = \frac{\sum_{k=1}^m (K_0 + \delta_{лк} - \delta_{пк})}{m} \quad (13)$$

$$s_2^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m [K_0 + \delta_{лк} - \delta_{пк} - M_2(K)]^2 \quad (14)$$

где m – количество контрольных точек; K_0 – расстояние между прямыми линиями.

Выражения (13) и (14) относятся к крановому пути в целом и не учитывают пройденного краном расстояния в i -м цикле l_{ki} . Если представить результаты измерений отклонений кранового пути в плане относительно прямых линий в виде некоторой функциональной зависимости от пройденного краном пути, то эти выражения примут вид:

$$M_2(K)_i = \frac{\sum_{k=1}^{m_1} [K_0 + \delta_{лк}(l_{ki}) - \delta_{пк}(l_{ki})]}{m_1} \quad (15)$$

$$s_{2i}^2 = \frac{1}{m_1-1} \sum_{k=1}^{m_1} [K_0 + \delta_{лк}(l_{ki}) - \delta_{пк}(l_{ki}) - M_2(K)_i]^2 \quad (16)$$

где m_1 – количество расчетных точек для функций $\delta_{лк}(l_{ki})$ и $\delta_{пк}(l_{ki})$.

Введем индекс j , обозначающий номер ходового колеса. Очевидно, что траектория движения колес крана будет отличаться на расстояние между осями колес, например, для четырехколесного крана – на базу крана B_K (рис. 3):

$$\begin{aligned} \delta_{лк1}(l_{ki}) &= \delta_{лк3}(l_{ki}) = f(l_{ki}) \Big|_0^{l_{ki}} \\ \delta_{пк1}(l_{ki}) &= \delta_{пк3}(l_{ki}) = f(l_{ki}) \Big|_0^{l_{ki}} \\ \delta_{лк2}(l_{ki}) &= \delta_{лк4}(l_{ki}) = f(l_{ki}) \Big|_{B_K}^{l_{ki}+B_K} \\ \delta_{пк2}(l_{ki}) &= \delta_{пк4}(l_{ki}) = f(l_{ki}) \Big|_{B_K}^{l_{ki}+B_K} \end{aligned} \quad (17)$$

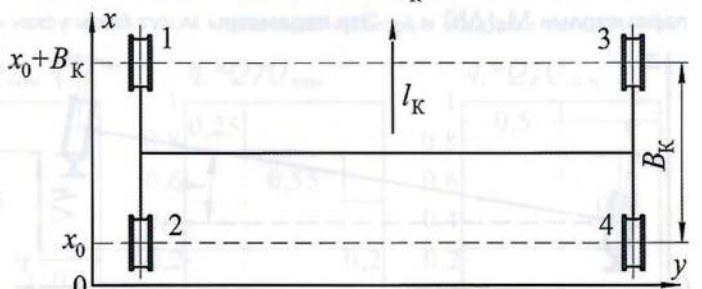


Рис. 3. Начальные условия для расчета траектории движения ходовых колес четырехколесного крана

Здесь $f(l_{ki})$ – условное обозначение некоторой функциональной связи между величинами.

Из [9 и 20] известно, что на долговечность реборд существенное влияние оказывает точность установки колес, называемая монтажным перекосом (рис. 4). Эту величину принято оценивать тангенсом угла перекоса колеса в горизонтальной плоскости $tg\beta$. Наличие монтажного перекоса колес приводит к тому, что реборда колеса с одной стороны сближаются с головкой рельса, уменьшая тем самым зазор между ними. Пусть при обследовании j -го колеса был определен некоторый монтажный перекос $tg\beta_j$. Условно считая точку контакта приложенной к середине реборды, получим

$$tg\beta_j = \frac{\Delta_{1ij}}{D_{ij}/2 + h_p/2} = \frac{2\Delta_{1ij}}{D_{ij} + h_p} \Rightarrow \Delta_{1ij} = \frac{tg\beta_j (D_{ij} + h_p)}{2}, \quad (18)$$

где Δ_{1ij} – сближение середины реборды с головкой рельса j -го колеса в i -м цикле работы крана, вызванное монтажным перекосом колеса.

Другим фактором, влияющим на сближение реборды ходового колеса и головкой рельса, является наклон колеса в вертикальной плоскости, вызванный разностью отметок головок рельсов в поперечном направлении (P_1). Этот угол может быть найден (рис. 5)

$$\gamma_j = \arcsin\left(\frac{\Delta h_{ij}}{S}\right), \quad (19)$$

где Δh_{ij} – разность высотных отметок левого и правого рельсов для колес, находящихся на одной оси. Аналогично выражению (18)

$$tg\gamma_j = \frac{2\Delta_{2ij}}{D_{ij} + h_p} \Rightarrow \Delta_{2ij} = \frac{tg\gamma_j (D_{ij} + h_p)}{2}, \quad (20)$$

где Δ_{2ij} – сближение середины реборды с головкой рельса j -го колеса в i -м цикле работы крана, вызванное разностью отметок головок рельсов в поперечном направлении.

Запишем разность высотных отметок левого и правого рельсов в виде нормально распределенной величины с параметрами $M_4(\Delta h)$ и s_4 . Эти параметры могут быть уста-

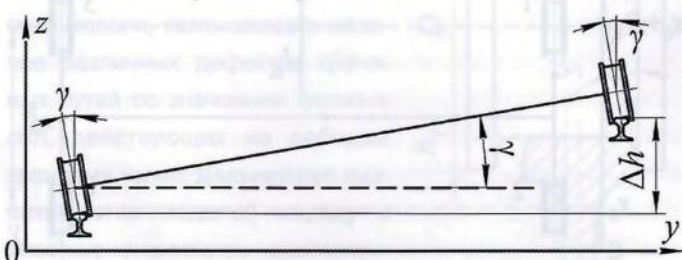


Рис. 5. Перекос колес, вызванный разностью отметок головок рельсов в поперечном направлении

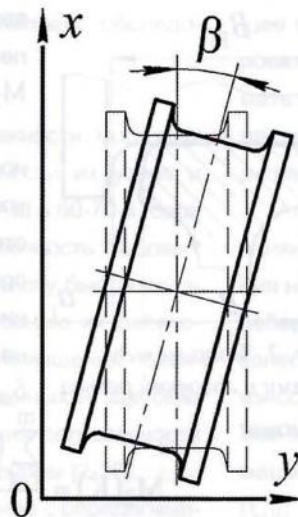


Рис. 4. Монтажный перекос колес

новлены по результатам обследования кранового пути, в результате которого получают отклонения кранового пути в профиле. Тогда математическое ожидание и дисперсия колеи крана могут быть найдены через разницу отклонений левого $h_{лк}$ и правого $h_{пк}$ рельса. Аналогично выражениям (15) и (16):

$$M_4(\Delta h)_i = \frac{\sum_{k=1}^{m_2} [\Delta h_0 + h_{лк}(l_{ki}) - h_{пк}(l_{ki})]}{m_2}, \quad (21)$$

$$s_{4i}^2 = \frac{1}{m_2 - 1} \sum_{k=1}^{m_2} [\Delta h_0 + h_{лк}(l_{ki}) - h_{пк}(l_{ki}) - M_4(\Delta h)_i]^2, \quad (22)$$

где Δh_0 – начальная разность высот, определенная при обследовании, m_2 – количество расчетных точек для функций $h_{лк}(l_{ki})$ и $h_{пк}(l_{ki})$.

Суммарное сближение середины реборды с головкой рельса j -го колеса в i -м цикле работы крана, вызванное обоими перекосами составит

$$\Delta_{ij} = \sqrt{\Delta_{1ij}^2 + \Delta_{2ij}^2}. \quad (23)$$

Тогда формула (11) может быть записана в виде

$$a_{ij} = \frac{b_{pij} - B}{2} - \Delta_{ij}. \quad (24)$$

А итоговое выражение для расчета средней в единицу времени продолжительности контактирования реборды с боковой гранью головки рельса j -го колеса в $i+1$ -м цикле работы крана примет вид

$$t_{Pai+1j} = 0,5 + \Phi_0 \left[\frac{M_1(T) - M_2(K) - (-1/2)(b_{pi} - B + U_{pi}) - \Delta_{i+1j}}{\sqrt{s_1^2 + s_2^2}} \right]. \quad (25)$$

Для определения горизонтальных нагрузок используем формулу, приведенную в [27]. Как отмечается в [10] результаты расчета, получаемые по этой формуле, наиболее хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными в работе [26]

$$P_{Горi} = 0,1 \frac{P_{вертi} S}{4B_k}. \quad (26)$$

В соответствии с [28] вертикальная нагрузка на ходовое колесо крана в i -м цикле может быть рассчитана

$$P_{вертi} = \frac{Q_{ст} + 2\alpha_{1i}(Q_{тел} + Q_i)}{n_{хк}}. \quad (27)$$

где $Q_{ст}$ – статическая нагрузка от веса металлоконструкции с установленным оборудованием, кабиной и др.; $Q_{тел}$ – вес тележки; Q_i – вес груза, поднимаемого в i -м цикле работы крана; $n_{хк}$ – число ходовых колес; $\alpha_{1i} = 1 - u_i / S$; u_i – расстояние от центра тяжести тележки до центра опорного узла в i -м цикле работы крана.

Из формулы (27) следует, что вертикальная нагрузка на ходовые колеса крана изменяется в зависимости от положения грузовой тележки и массы груза, поднимаемого в i -м

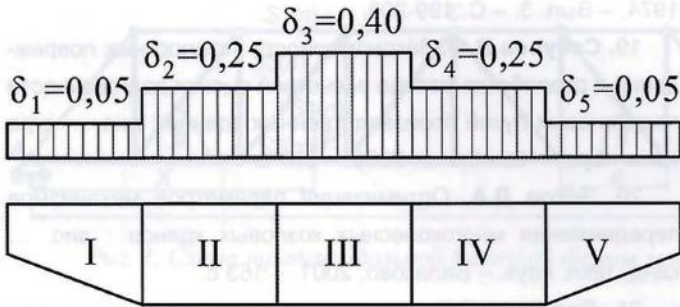


Рис. 6. Рекомендуемая ВНИИПТМАШ гистограмма положений грузовой тележки

цикле.

Для определения положения грузовой тележки в i -м цикле используем рекомендуемую ВНИИПТМАШ гистограмму положений тележки [28] (рис. 6), в которой мост крана условно разделен на пять частей с указанной вероятностью нахождения в них тележки. Гистограмму удобно реализовать в виде оператора выбора по алгоритму на рис. 7. Вначале генерируется некоторое случайное число ξ , принимающее значение от 1 до 100. Считая вертикальную нагрузку, приходящуюся на колеса, расположенные на одной концевой балке, одинаковой, определяем значения u_i в различных диапазонах числа ξ (см. рис. 7, u_i показаны как U_i) и нахождении тележки соответственно в I, II, III, IV и V частях моста.

Масса груза, поднимаемого краном в i -м цикле может быть получена на основе данных регистратора параметров крана, а при его отсутствии из типовых графиков нагружения для различных классов нагружения [28] (рис. 8), выраженная в долях от номинальной грузоподъемности крана $Q_{\text{НОМ}}$. Данные графики нагружения также удобно реализовать в виде оператора выбора.

Полученная математическая модель позволяет с использованием метода Мон-

те-Карло смоделировать на ЭВМ износ реборд в каждом цикле работы крана и определять количество циклов до достижения предельной величины износа, в результате чего прогнозировать долговечность (ресурс или срок службы) кранового колеса. Модель может быть использована в составе программного обеспечения комплекса для обследования крановых путей с целью прогнозирования долговечности крановых ходовых колес с учетом выявленных отклонений крановых путей и принятия на этой основе взвешенного решения о необходимости устранения тех или иных отклонений.

Литература

1. ВНИИПТМАШ. Отчет по теме «Исследование гамма-процентных ресурсов элементов крановых механизмов». Арх. № НИ-2944. – М.: ВНИИПТМАШ, 1977.
2. Ишлинский А.Ю. О проскальзывании в области контакта при трении качения // Изв. АН СССР: Отделение техн. наук. – 1956. – №6. – С. 3-15.
3. Ковальский Б.С. Расчет деталей на местное сжатие. – Харьков: ХВКИУ, 1967. – 224 с.
4. Изыскания по повышению долговечности крановых колес: Отчет / ВНИИ подъемно-транспортного машиностроения ВНИИПТМАШ. Рк. работы И.О. Спицына. Инв. № НИ 2760. – М., 1973. – 106 с.
5. Анисеева Ф.Л. Повышение износостойкости крановых колес и подкрановых рельсов при применении твердой смазки // Тр. ВНИИПТМАШ. – 1970. – Вып. 6(101). – С. 79-85.
6. Анисеева Ф.Л. Исследование долговечности крановых ходовых колес : дис. ... канд. техн. наук. – М., 1980. – 187 с.
7. Анисеева Ф.Л., Березин В.Н. Контроль точности установки подкрановых колес и смазка реборд // Реферативный сборник «Повышение прочности и долговечности крановых ходовых колес». – М.:

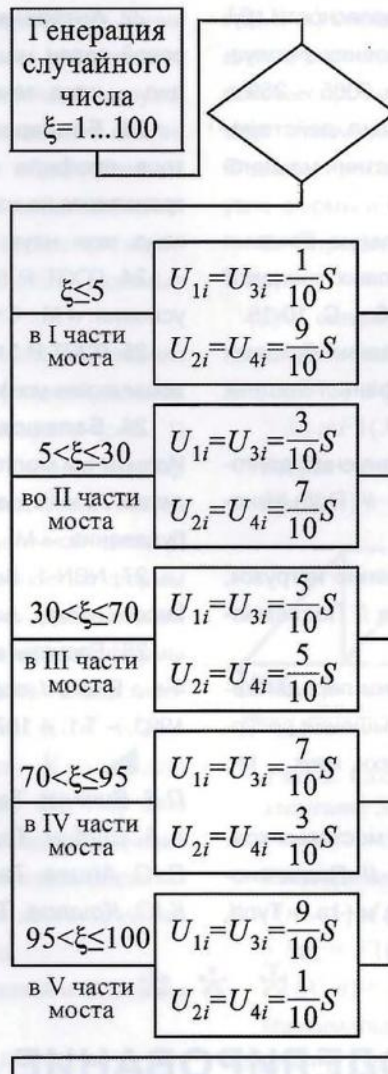


Рис. 7. Алгоритм моделирования положения грузовой тележки

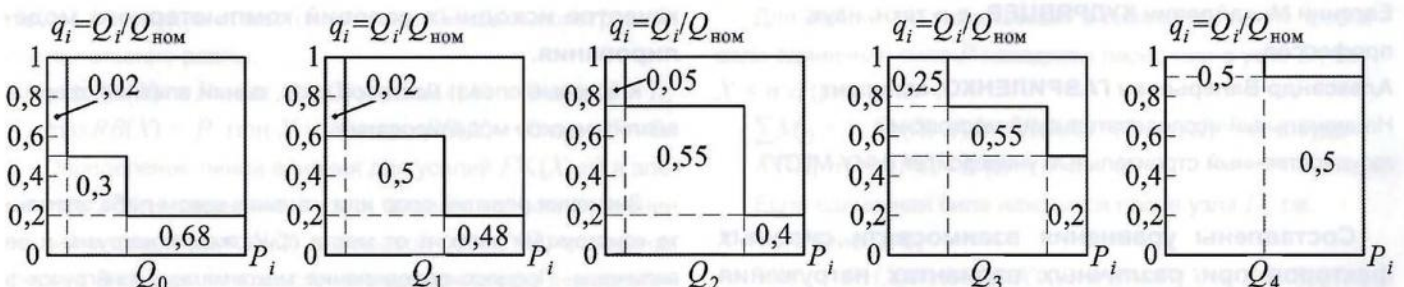


Рис. 8. Типовые графики нагружения для различных его классов

ЦНИИТЭИТЯЖМАШ, 1981. – С. 5-7.

8. **Аникеева Ф.Л.** Выбор соотношения твердости пары колесо-рельс и производство заготовок крановых колес // Реферативный сборник «Повышение прочности и долговечности крановых ходовых колес». – М.: ЦНИИТЭИТЯЖМАШ, 1981. – С. 7-9.

9. **Аникеева Ф.Л.** Пути повышения долговечности крановых ходовых колес. – М.: ЦНИИТЭИТЯЖМАШ, 1984. – 35 с.

10. **Липатов А.С.** Исследование случайных нагрузок на реборды колес мостовых кранов: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1982. – 133 с.

11. **Липатов А.С.** Методы повышения безопасности грузоподъемных кранов при ненормируемых условиях эксплуатации : дис. ... д-ра техн. наук. – Новочеркасск, 2005. – 259 с.

12. **Спицына Д.Н.** Исследование боковых сил, действующих на многоколесные мостовые краны // Вестник машиностроения. – 2003. – № 3. – С. 3-9.

13. **Спицына Д.Н., Юрин А.Н.** Определение боковых сил, действующих на ходовые колеса мостовых кранов // Подъемно-транспортное дело. – 2013. – № 5-6. – С. 10-15.

14. **Спицына Д.Н., Юрин А.Н.** Исследование боковых сил, действующих на движущиеся мостовые краны // Вестник машиностроения. – 2017. – № 10. – С. 39-45.

15. **Спицына Д.Н., Юрин А.Н.** Пути увеличения долговечности ходовых колес мостовых кранов // Подъемно-транспортное дело. – 2016. – № 1-2. – С. 2-7.

16. **Спицына Д.Н., Юрин А.Н.** Исследование нагрузок, возникающих при движении полярных кранов // Подъемно-транспортное дело. – 2017. – № 6. – С. 6-13.

17. **Лобов Н.А.** Разработка основ динамики передвижения кранов по рельсовому пути и методов повышения ресурса работы крановой системы : дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2005. – 293 с.

18. **Голутвина А.Л.** Износ ходовых колес мостовых кранов и пути повышения срока их службы // Подъемно-транспортные машины: Тр. Тульского политех. ин-та. – Тула,

1974. – Вып. 3. – С. 199-203.

19. **Сабуров В.Ф.** Закономерности усталостных повреждений и разработка метода расчетной оценки долговечности подкрановых путей производственных зданий : дис. ... д-ра техн. наук. – Челябинск, 2002. – 387 с.

20. **Зотов Д.А.** Оптимизация параметров механизмов передвижения многоколесных козловых кранов : дис. ... канд. техн. наук. – Балаково, 2001. – 153 с.

21. **Балашов В.П.** Исследование поперечных сил при движении мостовых кранов : дис. ... канд. техн. наук. – М., 1958. – 193 с.

22. **Антерейкин Е. С.** Оценка влияния параметров рельсовой колеи на интенсивность износа рельсов в кривых : дис. ... канд. техн. наук. – М., 2010. – 187 с.

23. **Бондаренко А.И.** Влияние геометрических параметров профиля поверхности катания колеса рельсового транспорта на износ контактирующих поверхностей : дис. ... канд. техн. наук. – М., 2000. – 144 с.

24. ГОСТ Р 53866-2010. Рельсы крановые. Технические условия. – М.: Стандартиформ, 2011. – 13 с.

25. ГОСТ Р 51685-2013. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия. – М.: Стандартиформ, 2014. – 101 с.

26. **Балашов В.П., Розенштейн Б.М., Щербакова И.М.** Испытания мостового крана грузоподъемностью 12,5 т, пролетом 23 м // Новые конструкции и типизация кранового оборудования. – М., 1962. – С. 44-64.

27. NBN-1. Belgium standard. Overhead cranes. Horizontal forces. – Repr. June, 1967.

28. Расчеты крановых механизмов и их деталей. – Изд. 4-е : В 2 т. / под ред. Р.А. Лалаянца. – М.: ВНИИПТМАШ, 1993. – Т.1. – 187 с.

П.В. Вутчук. Тел. +7(4842)74-05-59. zzzVentor@yandex.ru
А.А. Шубин. Тел. +7(4842)74-05-59. Shubin55@mail.ru
В.Ю. Анцев. Тел. +7(4872)25-46-88. anzev@tsu.tula.ru
К.Ю. Крылов. Тел. +7(4842)79-39-09. krylov@ritc-k.ru



АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИНИЙ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ФЕРМЫ МОСТОВОГО КРАНА

Евгений Михайлович КУДРЯВЦЕВ, д-р техн. наук, профессор,
Александр Валерьевич ГАВРИЛЕНКО, аспирант
Национальный исследовательский московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)

Составлены уравнения взаимосвязи силовых факторов при различных вариантах нагружения фермы стрелы мостового крана, используемые в

качестве исходных условий компьютерного моделирования.

Ключевые слова: мостовой кран, линии влияния, ферма, аналитическое моделирование.

Значения реакций опор или усилия к какому-либо элементу конструкции зависят от места приложения нагрузки и ее величины. Процесс определения максимальных нагрузок в каждом элементе секции фермы пролетного строения мосто-