

УДК 621.875.5

## Математическое моделирование ветровых нагрузок на механизмы передвижения порталных кранов с прямой стрелой

Н.Е. Подобед<sup>1</sup>, В.А. Подобед<sup>1</sup>, В.И. Меньшиков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Судоводительский факультет МА МГТУ, кафедра управления судном и промышленного рыболовства

<sup>2</sup> Судоводительский факультет МА МГТУ, кафедра судовождения

**Аннотация.** Составлена расчётная схема нагрузок на порталный кран с учетом воздействия ветровой нагрузки. Расчётная схема крана с грузом, как материальная система с шестью степенями свободы, представлена в совмещенных прямоугольных и цилиндрических системах координат. Получены расчётные аналитические зависимости ветровой нагрузки на кран с грузом с учётом динамической её составляющей, изменения скоростного напора ветра по высоте крана и собственных скоростей движения механизмов вылета стрелы, поворота и передвижения крана в функции обобщённых координат – вылета стрелы, угла поворота и передвижения крана. Составлена математическая модель режима работы порталных кранов с учётом работы механизма передвижения. Приведены результаты продувок порталного крана с прямой стрелой в аэродинамической трубе. Приведены основные результаты математического моделирования работы порталного крана с прямой стрелой при воздействии ветра с учётом работы механизма передвижения.

**Abstract.** The design model of portal crane loading accounting wind loading has been worked out. The analytical model of the crane with cargo as a material system with six degrees of freedom has been represented in integrated rectangular and cylinder coordinate systems. The mathematical model of portal cranes' operating regime accounting the motion mechanism has been proposed. Results of blowdown of a portal crane with a direct boom in a wind channel have been shown. Main results of modelling of portal crane (with a direct boom) operation at wind accounting the motion mechanism have been given.

### 1. Введение

В работах (Подобед, 2006a,b,c; 2007) приведены математическая модель и результаты исследования режимов работы портовых порталных кранов при ветровых нагрузках, в которых работа механизмов передвижения кранов не рассматривалась, так как предполагалось, что передвижение крана является установочным технологическим движением. Однако, как показывает практика, в условиях воздействия штормового ветра наблюдаются случаи аварийных ситуаций и даже аварий порталных кранов, а именно: угон кранов ветром, а также угон кранов ветром с последующей потерей его устойчивости, т.е. опрокидыванием. На рис. 1 показаны последствия аварии порталных кранов с прямой стрелой после воздействия ураганного ветра в одном из южных морских портов. В связи с этим весьма актуальным является математическое моделирование работы механизмов передвижения порталных кранов при воздействии ветра с целью определения допустимых ветровых нагрузок для их рабочего состояния, исходя из условий, обеспечивающих безопасность их работы. Такими условиями являются: ограничивающие движущие (тормозные) моменты и усилия электродвигателей механизмов, продолжительность переходных процессов (время разгона и торможения) механизмов передвижения, тормозные пути механизмов передвижения, коэффициент грузовой устойчивости крана в рабочем состоянии (величина запаса).

Основными задачами исследования являются: составление расчётной схемы положения груза в пространстве и воздействия ветровой нагрузки на порталный кран с учётом собственных скоростей движения крановых механизмов; составление расчётных аналитических зависимостей ветровой нагрузки на кран с грузом с учётом её динамической составляющей, изменения скоростного напора ветра по высоте крана и собственных скоростей движения механизмов в функции обобщённых координат:  $u$  – передвижения крана,  $\varphi$  – угла поворота стрелового устройства и  $\rho$  – вылета стрелы крана; составление математической модели режима работы порталного крана при динамическом воздействии ветровой нагрузки при работе всех четырех механизмов крана:



$$\begin{aligned}
 P_B &= AC_x KF_\rho \left( \bar{V}^2 \left( 1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \sin \omega_{it} \right)^2 + \tilde{h} \cos \varphi \bar{V} \left( 1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \sin \omega_{it} \right) + 2\tilde{u} \bar{V} \left( 1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \sin \omega_{it} \right) \right) = \\
 &= AC_x KF_{\tilde{h}} \bar{V} \left( 1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \sin \tilde{u}_{it} \right) \left( \bar{V} \left( 1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \sin \tilde{u}_{it} \right) + \tilde{h} \cos \varphi + 2\tilde{u} \right) \quad (1)
 \end{aligned}$$

вертикальная составляющая ветровой нагрузки на стрелу в плоскости качания, приведённая к точке подвеса груза "а"

$$\begin{aligned}
 P_{bh} &= AC_x KF_{\tilde{h}} \left( \bar{V}^2 \left( 1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \sin \tilde{u}_{it} \right)^2 + \tilde{h} \cos \varphi \bar{V} \left( 1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \sin \tilde{u}_{it} \right) + \right. \\
 &+ 2\tilde{u} \bar{V} \left( 1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \sin \tilde{u}_{it} \right) \left. \right) \left( \arcsin \frac{\tilde{r} - r_0}{L} - \operatorname{arctg} \frac{C_{y1}}{C_{x1}} \right) = \\
 &= AC_x KF_{\tilde{h}} \bar{V} \left( 1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \sin \tilde{u}_{it} \right) \left( \bar{V} \left( 1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \sin \tilde{u}_{it} \right) + \tilde{h} \cos \varphi + 2\tilde{u} \right) \times \\
 &\times \operatorname{tg} \left( \arcsin \frac{\tilde{r} - r_0}{L} - \operatorname{arctg} \frac{C_{y1}}{C_{x1}} \right) \quad (2)
 \end{aligned}$$

момент от сил ветра на поворотную часть крана

$$M_B = AC_M F_\varphi \tilde{h} \bar{V} \left( 1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \sin \tilde{u}_{it} \right) \left( \bar{V} \left( 1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \sin \tilde{u}_{it} \right) + 0,7 \tilde{h} \sin \varphi + \tilde{u} \right). \quad (3)$$

ветровая нагрузка на механизм передвижения крана по координате u

$$\begin{aligned}
 P_{BМК} &= A\bar{V} \left( 1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \sin \tilde{u}_{it} \right) F_c \sqrt{C_x^2 + C_y^2} \left( \bar{V} \left( 1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \sin \tilde{u}_{it} \right) + \tilde{h} \cos \varphi + 2\tilde{u} \right) + \\
 &+ AC_\Pi F_\Pi \left( 2\tilde{u} \bar{V} \left( 1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \sin \tilde{u}_{it} \right) + \bar{V}^2 \left( 1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \sin \tilde{u}_{it} \right)^2 \right), \quad (4)
 \end{aligned}$$

где кроме величин, указанных ранее, обозначены:  $C_x$ ,  $C_y$ ,  $C_\Pi$  – аэродинамические коэффициенты соответственно конструкции стрелы по координатам  $x$  и  $y$ , а также конструкции портала;  $F_\Pi$  – характерная наветренная площадь конструкции портала,  $m^2$ ;

ветровая нагрузка на груз по координате  $\rho_\alpha$

$$\begin{aligned}
 P_{Br} &= AC_r F_r \left( \bar{V}^2 \left( 1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \sin \tilde{u}_{it} \right)^2 \cos^2 \varphi + 2\tilde{h} \bar{V} \left( 1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \sin \tilde{u}_{it} \right) \cos \varphi + \right. \\
 &+ 2\tilde{u} \bar{V} \left( 1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \sin \tilde{u}_{it} \right) \cos^2 \varphi \left. \right) \quad (5)
 \end{aligned}$$

момент от ветровой нагрузки на груз относительно оси вращения крана по координате  $\varphi_\alpha$

$$\begin{aligned}
 M_{Br} &= AC_r F_r \tilde{h} \left( \bar{V}^2 \left( 1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \sin \tilde{u}_{it} \right)^2 \sin^2 \varphi + 2\tilde{h} \bar{V} \left( 1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \sin \tilde{u}_{it} \right) \sin \varphi + \right. \\
 &+ 2\tilde{u} \bar{V} \left( 1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \sin \tilde{u}_{it} \right) \sin^2 \varphi \left. \right) \quad (6)
 \end{aligned}$$

### 3. Обобщённая математическая модель и ее составляющие

Обобщённая математическая модель (7) режима работы порталных кранов получена на основе уравнения Лагранжа второго рода в виде нелинейной, неоднородной системы семи дифференциальных уравнений второго порядка с переменными коэффициентами, правая часть которых содержит случайные функции ветровой нагрузки. Полученная система описывает сложный процесс работы четырёх независимых механизмов кранов: трёх поступательных движений механизмов – передвижения и подъёма груза соответственно по координатам  $u$ ,  $z_\alpha$ , радиальное изменение вылеты стрелы по координате  $\rho$  и вращательное (относительно вертикальной оси) движение крана по координате  $\varphi$ , а также колебания гибкого подвеса груза по координатам  $\rho_\alpha$ ,  $\varphi_\alpha$ ,  $u_\alpha$ . В связи с принятой системой обобщённых координат

нагрузки и массы приводятся: у механизма подъёма – к окружности грузового барабана, у механизма изменения вылета – к точке подвеса груза, у механизма поворота – к оси вращения крана, у механизма передвижения крана – к оси ходового приводного колеса механизма.

$$\begin{aligned}
 & 1. \ddot{u} + m_k (\ddot{\rho} - \rho \dot{\varphi}^2) \cos \varphi - m_k (2\dot{\rho}\dot{\varphi} + \rho\ddot{\varphi}) \sin \varphi + \frac{m_k}{m_a} \cdot \frac{S}{l} ((u - u_\alpha) - (\varphi - \varphi_\alpha) \rho_\alpha \sin \varphi - \\
 & \quad - (\rho_\alpha - \rho) \cos \varphi) = \frac{m_k}{m_a} (P_u - P_{TP} - P_y - P_{BМК}); \\
 & 2. \ddot{\varphi} + \frac{J_\rho}{J} \dot{\rho}\dot{\varphi} - \frac{1}{2} \frac{J_\rho}{J} \ddot{u} \sin \varphi + \frac{\rho}{J} \frac{S}{l} ((\varphi - \varphi_\alpha) \rho_\alpha - (u - u_\alpha) \sin \varphi) = \\
 & \quad = \frac{1}{J} (M_\varphi - M_{TP} - M_y - M_B); \\
 & 3a. \ddot{\rho} - \frac{1}{2} \frac{J_\rho}{m_a} \dot{\varphi}^2 + \ddot{u} \cos \varphi - \frac{S}{m_a \cdot l} ((\rho_\alpha - \rho) - (u - u_\alpha) \cos \varphi) = \\
 & \quad = \frac{1}{m_a} (P_\rho - P_{mp} - P_c - P_\theta); \\
 & 3б. \ddot{\rho} + \frac{\rho - r_0}{(h - h_0)^2} \dot{\rho}^2 - \frac{1}{2} \frac{J_\rho}{m_a} \frac{(h - h_0)^2}{L^2} \dot{\varphi}^2 + \ddot{u} \frac{(h - h_0)^2}{L^2} \cos \varphi - \frac{S}{m_a} \frac{(h - h_0)^2}{L^2 l} ((\rho_\alpha - \rho) - \\
 & \quad - (u - u_\alpha) \cos \varphi) = \frac{1}{m_a} \frac{(h - h_0)^2}{L^2} ((P_\rho - P_{mp} - P_c - P_\theta) - (P_h - P_{mph} - P_{ch} - P_{\theta h})); \\
 & 4. \ddot{u}_\alpha + (\dot{\rho}_\alpha - \rho_\alpha \dot{\varphi}_\alpha^2) \cos \varphi_\alpha - (\dot{\rho}_\alpha \dot{\varphi}_\alpha + \dot{\rho}_\alpha \dot{\varphi}_\alpha) \sin \varphi_\alpha - \frac{S}{ml} ((\dot{u} - u_\alpha) - (\varphi - \varphi_\alpha) \rho_\alpha \sin \varphi_\alpha - \\
 & \quad - (\rho_\alpha - \rho) \cos \varphi_\alpha) = \frac{P_{BГ}}{m}; \\
 & 5. \ddot{\varphi}_\alpha + 2 \frac{\dot{\rho}_\alpha}{\rho_\alpha} \dot{\varphi}_\alpha - \frac{1}{\rho_\alpha} \ddot{u}_\alpha \sin \varphi_\alpha - \frac{S}{m \tilde{\pi}_\alpha \cdot l} ((\varphi - \varphi_\alpha) \rho_\alpha + (u - u_\alpha) \sin \varphi) = \frac{M_{BГ}}{m \rho_\alpha^2}; \\
 & 6. \ddot{\rho}_\alpha - \rho_\alpha \dot{\varphi}_\alpha^2 + \ddot{u}_\alpha \cos \varphi_\alpha + \frac{S}{m \cdot l} ((\rho_\alpha - \rho) + (u - u_\alpha) \cos \varphi) = \frac{P_{BГ}}{m}; \\
 & 7. z_\alpha + \frac{m}{m + m_n n_n^2} g = \frac{P_z n_n}{m + m_n n_n^2}; \\
 & S = \frac{nm}{m + n^2 m} (P_l + nm_n g).
 \end{aligned} \tag{7}$$

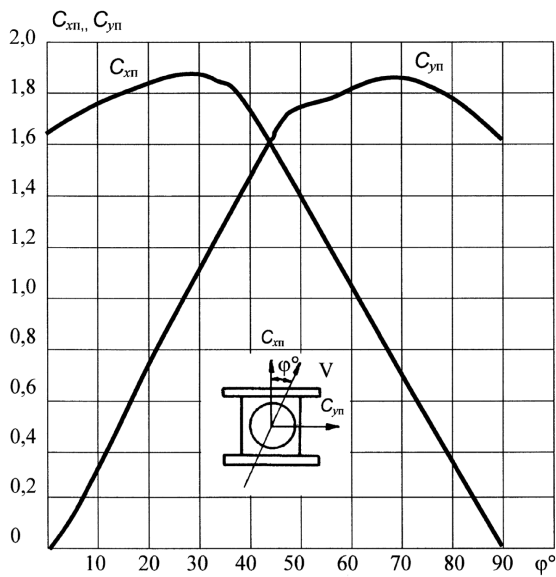


Рис. 3. Аэродинамические характеристики портала крана с прямой стрелой

Уравнение 1 системы (7) описывает работу механизма передвижения крана с учетом влияния работы механизма подъема груза, вылета стрелы и поворота крана, уравнение 2 описывает работу механизма поворота крана, уравнение 3а – работу механизма вылета стрелы порталных кранов с шарнирно-сочлененной укосиной, а 3б – кранов с прямой стрелой и уравнительным полиспастом. Уравнения 4, 5, 6 описывают вынужденные колебания груза соответственно по координатам  $u_\alpha$ ,  $\varphi_\alpha$ ,  $\rho_\alpha$ . Уравнение 7 описывает работу механизма подъема груза.

В уравнениях 1-7 системы (7) обозначены  $m_k = m_a / (m_a + m_n)$ ;  $m_n = m_a + m_n$ , где  $m_a$  – масса поворотной части крана, приведённая к точке подвеса груза "а";  $m_n$  – масса неповоротной части (портала), сосредоточенная в её центре тяжести с координатой  $u$ ;  $m$  – масса груза;  $m_n$  – масса вращающихся частей подъёмного

механизма, приведённая к окружности барабана лебёдки.  $P_u, P_\rho, P_h$  – избыточные горизонтальные усилия, приложенные соответственно к крану (по координате  $u$ ) и концу стрелы по координате  $\rho$ ;  $M_\varphi$  – избыточный момент, приведённый к оси вращения крана;  $nP_l$  – усилие на подвеску груза. Моменты от сил трения  $M_{mp}$  в механизме поворота и наклона (крена) крана  $M_y$  рассчитываются или принимаются согласно заводским данным. Нагрузки от сил трения  $P_{тр}$  в механизме вылета стрелы и от неуравновешенности собственного веса стрелового устройства и веса груза  $P_c$  также рассчитываются или принимаются согласно заводским данным. При этом величина  $P_c$  аппроксимируется функцией вылета стрелы  $\rho$ .  $P_b, P_{bh}$  – ветровая нагрузка на стреловое устройство крана, приведённая к точке подвеса груза, соответственно по координате  $\rho$  в плоскости качания стрелы и вертикальная её составляющая, формулы (1-2). Момент от сил ветра на поворотную часть крана  $M_b$  определяется формулой (3). Ветровая нагрузка на механизм передвижения крана  $P_{вмк}$  определяется формулой (4). Ветровая нагрузка на груз  $P_{вг}$  по координате  $\rho_\alpha$  определяется формулой (5), а момент от ветровой нагрузки на груз относительно оси вращения крана  $M_{вг}$  по координате  $\varphi_\alpha$  – формулой (6).

Коэффициенты уравнений, определяющие динамические характеристики порталного крана, силовые параметры электропривода, а также другие постоянные величины, определяются на основе паспортных данных (Подобед, 2006с). На рис. 4-5 приведены аэродинамические характеристики сопротивления отдельных частей порталного крана с прямой стрелой (портала, стрелы в плоскости качания и поворотной части крана в сборе) в функции угла атаки воздушного потока при изменении вылета стрелы и поворота крана, полученные экспериментально по методике, изложенной в работе (Ерофеев и др., 1976). Как следует из приведенных рисунков, максимальная ветровая нагрузка на порталный кран действует при углах атаки воздушного потока на стреловое устройство  $\pm 20^\circ$ , а на конструкцию портала  $\pm 30^\circ$ . Коэффициенты аэродинамического сопротивления отдельных частей крана аппроксимируются аналитическими зависимостями в функции вылета стрелы  $\rho$  и угла поворота крана  $\varphi$ .

Формулы (8-9) описывают аналитические зависимости коэффициентов аэродинамического сопротивления поворотной части порталного крана с прямой стрелой, где  $C_m$  – моментная характеристика поворотной части крана,  $C_x$  – коэффициент аэродинамического сопротивления стрелового устройства в присутствии поворотной колонны:

$$C_m = \begin{cases} 0,57\varphi, & 0 \leq \varphi < 0,87, \\ 0,50, & 0,87 < \varphi < 2,27, \\ 2,10 - 0,7\varphi, & 2,27 < \varphi \leq 3,14. \end{cases} \quad (8)$$

$$C_x = \begin{cases} 1,6 \cos \frac{L^2 - (\rho - r_0)^2}{L^2}, & 0 \leq \varphi \leq 1,57, \\ 1,4 \cos \frac{L^2 - (\rho - r_0)^2}{L^2}, & 1,57 < \varphi \leq 3,14. \end{cases} \quad (9)$$

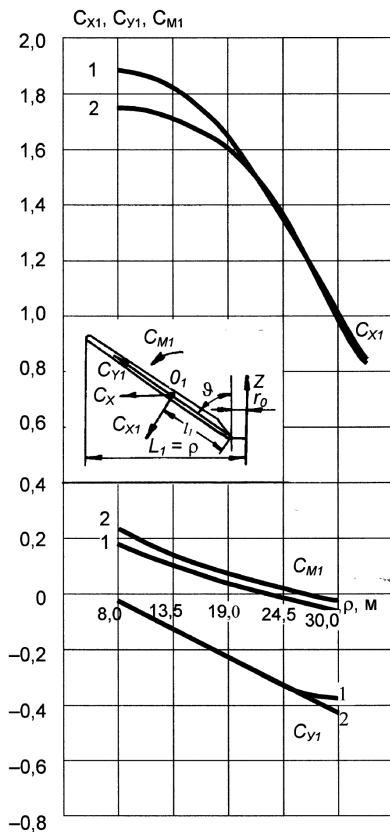


Рис. 4. Аэродинамические характеристики стрелового устройства крана с прямой стрелой в плоскости качания стрелы. Цифрами обозначены кривые характеристик, соответствующие направлениям потоков на стрелу: 1 – встречный; 2 – попутный

#### 4. Моделирование на ЭВМ режима работы механизмов передвижения порталных кранов при динамическом воздействии ветра

Моделирование на ЭВМ режима работы механизмов передвижения порталных кранов при динамическом воздействии ветра с учетом работы механизмов подъема груза, изменения вылета стрелы и поворота крана производится численным интегрированием системы дифференциальных уравнений (7) по методике, приведенной в работе (Подобед, 2006с). Рассмотрен частный случай работы порталного крана: работа механизмов подъема груза, изменения вылета стрелы и поворота крана и их влияние на механизм передвижения крана. При численном моделировании режима работы крановых механизмов при исходных данных ветровой нагрузки (Подобед, 2006с) для типовых циклов работы крана получены зависимости в функции времени ускорений точки подвеса и самого груза

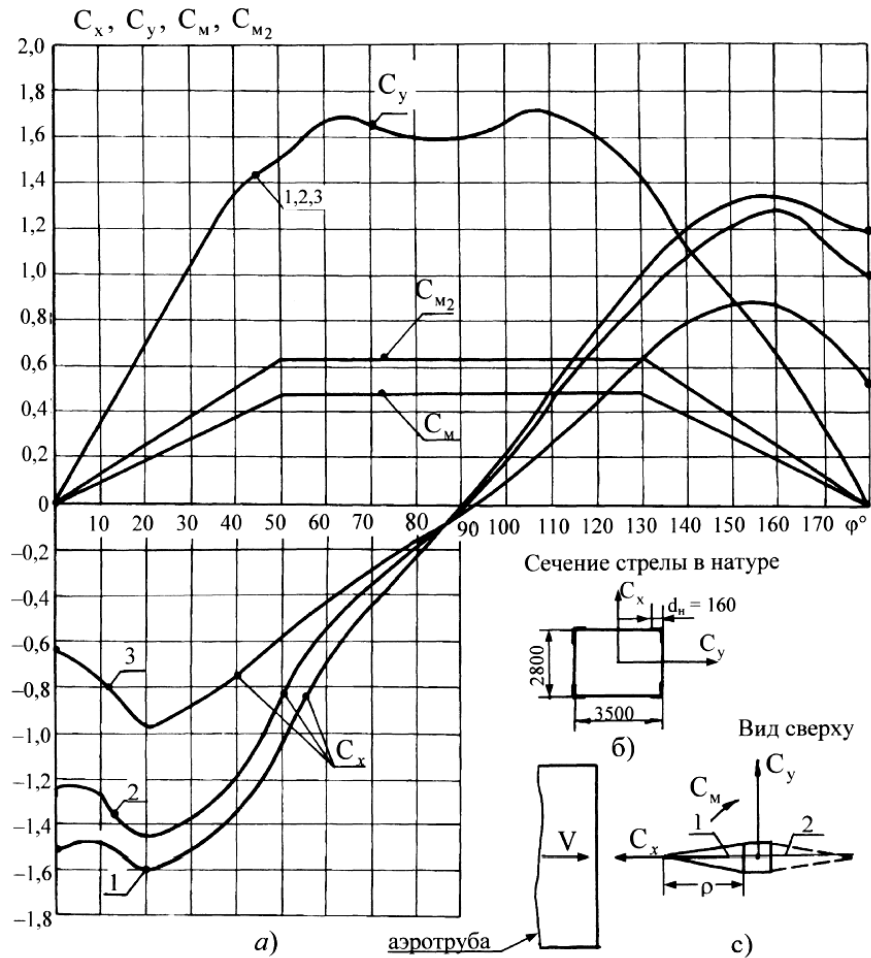


Рис. 5. Аэродинамические характеристики стрелового устройства крана с прямой стрелой в присутствии поворотной колонны: а – цифрами обозначены кривые характеристик, соответствующие вылету стрелы: 1 – 0,16 м; 2 – 0,3 м; 3 – 0,6 м; б – сечение стрелы (размеры в мм); с – положение стрелы: 1 – при  $\varphi = 0^\circ$ ; 2 – при  $\varphi = 180^\circ$

(рис. 6), скоростей, путей перемещения крановых механизмов и углов раскачивания груза в пространстве, максимальные и эквивалентные эксплуатационные нагрузки в механизмах крана. Выявлены экстремальные положения портального крана, при которых на кран воздействуют максимальные ветровые нагрузки. При ветровых нагрузках, близких к паспортным значениям, работа всех четырех механизмов практически никогда не производится. Такое движение механизмов возможно только лишь в крюковом и рейферном режимах (порожнем) в начальный момент передвижения крана по подкрановым путям при отсутствии ветра. В дальнейшем, согласно требованиям правил по технике безопасности и инструкции по эксплуатации, оператор (крановщик) обязан наблюдать за состоянием подкрановых путей, по которым перемещается кран, а также за состоянием питающего кран электрического кабеля. В этом случае поворотная часть крана и его стреловое устройство должны располагаться наименьшей наветренной площадью по отношению к направлению ветра. Выявленные экстремальные положения крана по отношению к направлению ветра и возникающие при этом максимальные нагрузки в механизмах вылета стрелы и поворота крана должны учитываться при расчетах механизмов передвижения на ветровую нагрузку.

## 5. Заключение

Составлена расчетная схема нагрузок на крановые механизмы при динамическом воздействии ветра. Получены аналитические зависимости ветровой нагрузки на кран с грузом с учётом динамической составляющей, изменения давления ветра по высоте крана и собственных скоростей движения механизмов в функции обобщённых координат – передвижения крана, угла поворота и вылета стрелы

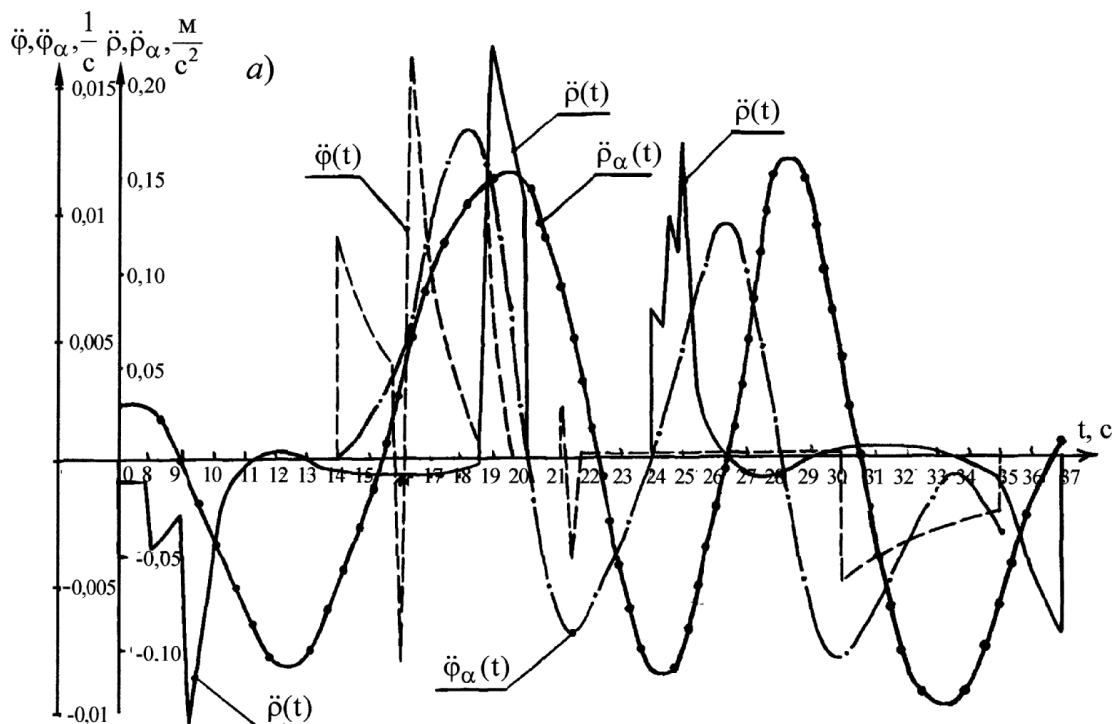


Рис. 6. Ускорение точки подвеса и самого груза

крана. Составляющие ветровой нагрузки, вызванные собственными скоростями движения механизмов крана, увеличивают нагрузку от сил ветра на механизмы передвижения и вылета стрелы крана соответственно на 10-20 %, а на механизм поворота крана на 30-40 %. Составлена математическая модель режима работы портовых порталных кранов с учётом работы механизмов передвижения кранов. Приведенные результаты продувок порталного крана с прямой стрелой в аэродинамической трубе позволили получить аналитические зависимости коэффициентов аэродинамического сопротивления конструкции порталного крана в функции вылета стрелы и угла поворота крана. Изложена методика и результаты исследования с помощью численных методов основных показателей работы крановых механизмов при динамическом воздействии ветра.

#### Литература

- Ерофеев Н.И., Лисовой П.Я., Подобед В.А.** Экспериментальное определение аэродинамических характеристик модели порталного крана. *Известия ВУЗов. Машиностроение*, № 5, с.127-131, 1976.
- Подобед В.А.** Математическое моделирование ветровых нагрузок на портовые порталные краны. *Вестник МГТУ*, т.9, № 2, с.318-331, 2006а.
- Подобед В.А.** Повышение эффективности использования портовых кранов при ветровых нагрузках. *Автореф. дис. ... д-ра техн. наук, Москва, МГАВТ*, 46 с., 2007.
- Подобед В.А.** Работа портовых кранов при ветровых нагрузках. *Морской флот*, № 6, с.68-70, 2006б.
- Подобед В.А.** Теоретические исследования основных показателей работы порталного крана "Альбрехт" при динамическом воздействии ветра. *Вестник МГТУ*, т.9, № 3, с.522-530, 2006с.
- Подобед Н.Е., Подобед В.А., Меньшиков В.И.** Математическое моделирование режима работы механизмов передвижения доковых кранов при штормовом ветре. *Конференция по строительной механике корабля памяти академика Ю.А. Шиманского. Тезисы докладов. ФГУП "ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова", Всероссийское научно-техническое общество судостроителей имени акад. А.Н. Крылова. СПб.*, с.97-98, 2008.