

# Теоретические исследования основных показателей работы портального крана "Альбрехт" при динамическом воздействии ветра

**В.А. Подобед**

*Судоводительский факультет МА МГТУ,*

*кафедра управления судном и промышленного рыболовства*

**Аннотация.** Составлена математическая модель режима работы портального крана "Альбрехт" при динамическом воздействии ветра. Установлены основные показатели, определяющие работоспособность крана при воздействии ветра, к которым относятся: максимальные и эквивалентные нагрузки на механизмы поворота и вылета стрелы крана; пространственный угол отклонения грузовых канатов от вертикали; время пуска (торможения) механизмов поворота и вылета стрелы крана. С помощью математической модели исследованы основные показатели работоспособности крана для характерных циклов его работы в функции времени. В результате выполненных исследований получены допустимые скорости ветра для рабочего состояния крана в зависимости от массы груза и его наветренной площади.

**Abstract.** The mathematical model of an operating mode of the portal crane "Albrecht" under dynamic influence of wind has been worked out. The basic parameters determining crane working capacity under wind influence have been determined. They are: the maximal and equivalent loadings on turn mechanisms and the crane arrow start; the spatial corner of a cargo ropes deviation from a vertical; starting time of turn mechanisms and the crane arrow start. By means of the mathematical model the basic parameters of the crane working capacity for its work characteristic cycles in a time function have been researched. Allowable wind speeds for a crane working condition depending on lading weight and its windward square have been received.

## 1. Введение

Портальные краны, как было указано в статье (Подобед, 2006), рассчитаны на статическую ветровую нагрузку. В соответствии с Правилами по технике безопасности в рыбных портах (Правила..., 1970), работа кранов запрещается при скорости ветра 15 м/с и более, измеряемой в порывах, независимо от типа крана и технологии перегрузочных работ. Отсутствие исследований влияния ветровой нагрузки с учетом ее динамической составляющей на работоспособность портальных кранов не позволяло определить реально допустимые скорости ветра для их рабочего состояния. Это приводило к простоям судов, вагонов и рабочей силы в портах по причине сильного ветра.

Целью настоящего исследования является теоретическое обоснование допустимых скоростей ветра для рабочего состояния крана. В связи с изложенными основными задачами исследования являются: определение основных показателей работоспособности крана при воздействии ветра; составление математической модели режима работы крана при воздействии ветровой нагрузки с учетом динамической ее составляющей; исследование с помощью математической модели основных показателей работоспособности крана для характерных циклов его работы; определение допустимых скоростей ветра для рабочего состояния крана в зависимости от технологии перегрузочных работ, массы груза и его наветренной площади.

## 2. Обобщенная математическая модель работы портального крана

### 2.1. Исследуемые показатели портальных кранов

Работоспособность портального крана в условиях ветра характеризуется следующими основными показателями: максимальными эксплуатационными нагрузками на механизмы поворота и вылета стрелы крана, эквивалентными нагрузками на эти же механизмы, определяющими нагрев электродвигателей, углами раскачивания груза, управляемостью крана, которая характеризуется переходными процессами механизмов и грузовой устойчивостью крана.

Условия, ограничивающие величину показателей работоспособности крана при ветре: максимальные нагрузки на механизмы поворота и вылета стрелы крана

$$M_{max} \leq [M_{\text{де}}] \quad (1),$$

$$P_{max} \leq [P_{\text{де}}] \quad (2);$$

эквивалентные нагрузки на механизмы поворота и вылета стрелы крана

$$M_s \leq [M_s] \quad (3),$$

$$P_s \leq [P_s] \quad (4);$$

пространственный угол отклонения грузовых канатов от вертикали

$$\alpha_{max} \leq [\alpha] \quad (5);$$

время пуска (торможения) механизмов поворота и вылета стрелы крана

$$t_{n(m)} \leq [t_{n(m)}] \quad (6);$$

коэффициент грузовой устойчивости крана в рабочем состоянии

$$K_V \leq [K_V] \quad (7).$$

Условия (1-2) ограничивают перегрузку, а (3-4) – перегрев электродвигателей механизмов крана. Условие (5) ограничивает максимальные нагрузки на механизмы крана от раскачивания груза и максимальные амплитуды раскачивания груза. Условие (6) обеспечивает надежную управляемость крана и соответствующую его производительность, а условие (7) – грузовую устойчивость крана с нормированным запасом. Допустимые максимальные нагрузки в условиях (1-2) указываются в расчетах крана и ограничиваются настройкой максимальной электрической защиты двигателей механизмов, допустимые эквивалентные нагрузки – паспортными значениями двигателей для конкретных режимов работы. Допустимые углы раскачивания груза в пространстве и время переходных процессов механизмов принимаются на основании паспортных данных и условий, обеспечивающих надежную управляемость крана. Левые части неравенств (1-6) определяются решением уравнений, моделирующих работу кранов при ветровом воздействии, а (7) – расчетом на максимальные порывы ветра.

## 2.2. Математическая модель режима работы крана при ветре

Математическая модель работы крана при воздействии ветра (8) может быть получена с учетом следующих условий и допущений, вполне приемлемых для теоретического исследования основных показателей работы крана. Система крана с грузом является жесткой, неконсервативной с голономной нестационарной, идеальной связью; колебания груза на гибком подвесе считаются малыми. Расчетная схема крана с грузом при воздействии ветра и ряд других допущений приведены в статье (Подобед, 2006).

$$\left. \begin{aligned} 1. \ddot{\varphi} + \frac{J_{\rho}}{J} \dot{\rho} \dot{\varphi} + \frac{S}{J} \frac{\varphi - \varphi_{\alpha}}{l} \rho^2 &= \frac{1}{J} \left( M_{\varphi} - M_{mp} - M_y - AC_{\mathcal{M}} F_{\varphi} \rho \times \right. \\ &\times \left. \left( \dot{\varphi} \bar{V} \left( 1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \sin \omega_i t \right) \sin \varphi + \bar{V}^2 \left( 1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \sin \omega_i t \right)^2 \right) \operatorname{sgn} V \right); \\ 2a. \ddot{\rho} - \frac{1}{2} \frac{J_{\rho}}{m_a} \dot{\varphi}^2 - \frac{S}{m_a} \frac{\rho_{\alpha} - \rho}{l} &= \frac{1}{m_a} \left( P_{\rho} - P_{mp} - P_c - AC_x K F_{\rho} \bar{V}^2 \times \right. \\ &\times \left. \left( 1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \sin \omega_i t \right)^2 \operatorname{sgn} V \right); \\ 2б. \ddot{\rho} + \frac{\rho - r_0}{(h - h_0)^2} \rho^2 - \frac{1}{2} \frac{J_{\rho}}{m_a} \frac{(h - h_0)^2}{L^2} \dot{\varphi}^2 - \frac{S}{m_a} \frac{\rho_{\alpha} - \rho}{l} \frac{(h - h_0)^2}{L^2} &= \\ = \frac{(h - h_0)^2}{m_a L^2} \left( \left( P_{\rho} - P_{mp} - P_c - AC_x K F_{\rho} \bar{V}^2 \left( 1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \sin \omega_i t \right)^2 \operatorname{sgn} V \right) - \right. \\ &- \left. \left( P_h - P_{mph} - P_{ch} - AC_x K F_{\rho} \bar{V}^2 \left( 1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \sin \omega_i t \right)^2 \right) \times \right. \\ &\times \left. \operatorname{tg} \left( \arcsin \frac{\rho - r_0}{L} - \operatorname{arctg} \frac{C_{y1}}{C_{x1}} \right) \operatorname{sgn} V \frac{\rho - r_0}{h - h_0} \right); \\ 3. \ddot{\varphi}_{\alpha} + 2 \frac{\dot{\rho}_{\alpha}}{\rho_{\alpha}} \dot{\varphi}_{\alpha} - \frac{S}{m} \frac{\varphi - \varphi_{\alpha}}{l} \frac{\rho}{\rho_{\alpha}} &= \frac{AC_z F_z}{m \rho_{\alpha}} \left( 2 \dot{\varphi} \rho \bar{V} \left( 1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \sin \omega_i t \right) \times \right. \\ &\times \left. \sin \varphi + \bar{V}^2 \left( 1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \sin \omega_i t \right)^2 \sin^2 \varphi \right) \operatorname{sgn} V; \\ 4. \ddot{\rho}_{\alpha} - \rho_{\alpha} \dot{\varphi}_{\alpha}^2 + \frac{S}{m} \frac{\rho_{\alpha} - \rho}{l} &= \frac{AC_z F_z}{m} \bar{V}^2 \left( 1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \sin \omega_i t \right)^2 \cos^2 \varphi \operatorname{sgn} V; \\ 5. \ddot{z}_{\alpha} + \frac{m}{m + m_n n_n^2} g &= \frac{P_z n_n}{m + m_n n_n^2}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Нестационарными связями являются переменная высота  $h_1$  точки подвеса груза "а" и переменная длина подъемного каната  $l$ . Обозначив  $h - h_0 = h_1$ , получим

$$h_1 = (L^2 - (\rho - r_0)^2)^{1/2} \quad (9), \quad l = \left( (\varphi - \varphi_\alpha)^2 \rho_c^2 + (\rho_\alpha - \rho)^2 + (h_1 - z_\alpha)^2 \right)^{1/2}, \quad (10)$$

где  $l$  является функцией времени  $l = l(t)$ ;  $\rho_c = 0,5 (\rho + \rho_\alpha)$  – среднее значение вылета стрелы.

Отсчет величины  $z_\alpha$  ведется от уровня подкрановых рельсов.

Математическая модель работы крана с учетом воздействия ветровой нагрузки получена на основе уравнений Лагранжа второго рода. Число дифференциальных уравнений движения крана с грузом соответствует числу обобщенных координат.

Математическая модель работы портального крана с грузом представлена системой пяти нелинейных неоднородных дифференциальных уравнений второго порядка, члены которых содержат случайные функции ветровой нагрузки. Система уравнений описывает три независимых совмещенных движения: подъем груза, вылет стрелы и поворот крана при гибком подвесе груза.

Уравнение 1 системы (8) описывает работу механизма поворота при переменных величинах – длине подвеса груза  $l$  и моменте инерции поворотной части крана  $J$ . Уравнения 2 записаны для механизмов изменения вылета кранов соответственно:  $2a$  – с шарнирно-сочлененной укосиной и  $2b$  – с прямой стрелой с уравнительными устройствами. Уравнения 3 и 4 описывают вынужденные колебания груза с учетом действия ветровой нагрузки. Уравнение 5 описывает работу механизма подъема.

Данная система уравнений включает описание процесса вынужденных колебаний груза в пространстве, величина которых на основе геометрических соотношений определяется следующей формулой

$$\alpha \cong (1/l) \cdot \left( (\rho_\alpha - \rho)^2 + \left( (\rho_\alpha + \rho)/2 \cdot (\varphi - \varphi_\alpha) \right)^2 \right)^{1/2}. \quad (11)$$

Правые части уравнений системы (8) содержат члены, описывающие силовые факторы управления механизмами и возмущения на кран с грузом. Приводом механизмов крана являются асинхронные электродвигатели с фазным ротором. Регулирование пускового момента в таком приводе осуществляется ступенчатым реостатом в цепи ротора. Силовые факторы управления в уравнениях 1, 2, 5 системы уравнений (8) могут быть представлены в виде аппроксимированных линейных функций скоростей механизмов

$$M_\varphi = K_\varphi (\dot{\varphi}_c - \dot{\varphi}); \quad P_\rho = K_\rho (\dot{\rho}_c - \dot{\rho}); \quad P_z = K_z (\dot{z}_c - \dot{z}), \quad (12)$$

где  $K_\varphi$ ,  $K_\rho$ ,  $K_z$  – угловые коэффициенты наклона графиков механических характеристик электродвигателей, которыми являются скорости, соответственно, механизмов поворота крана, вылета стрелы и механизма подъема груза; в скобках обозначены, соответственно, синхронные и действующие скорости движения соответственно механизмов поворота крана, вылета стрелы и подъема груза.

Моменты от сил трения  $M_{np}$  в механизме поворота и наклона (крена) крана  $M_y$  рассчитываются или принимаются согласно заводским данным. Нагрузки от сил трения  $P_{np}$  в механизме изменения 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.

Функция  $\text{sgn}V$  в уравнениях 1 и 3 системы (8) равна  $-1$  при вращении крана против ветра и  $+1$  при вращении по ветру, а при  $V=0$  функция  $\text{sgn}V = 0$ . В уравнениях 2 и 4  $\text{sgn}V$  равна  $-1$ , если проекция вектора скорости на плоскость качания стрелы направлена к оси вращения крана, и  $+1$  – от оси вращения крана.

### 3. Моделирование на ЭВМ режима работы крана при ветре и обсуждение результатов

#### 3.1. Метод решения и исходные данные

Основные показатели работоспособности портального крана при воздействии ветра определяются численным интегрированием системы дифференциальных уравнений (8) на ЭВМ. Для интегрирования использовалась стандартная подпрограмма решения дифференциальных уравнений  $n$ -го порядка на ЭВМ по методу Рунге-Кутты четвертого порядка с автоматическим выбором шага интегрирования по Мерсону. При введении ветровой нагрузки как случайного процесса с нормальным ее распределением интегрирование уравнений системы сводится к прямому вводу в ЭВМ каждой реализации случайного процесса. Интегрирование уравнений является задачей Коши. Начальные условия принимаются на основе типовой расчетной структуры моделируемого цикла работы крана. При этом начальное значение скорости ветра принимается равным средней скорости, а ветровой поток – нарастающим, что является худшим случаем для режима работы крана при воздействии ветра.

Коэффициенты уравнений, характеризующие динамические характеристики портального крана, силовые параметры электропривода, а также другие постоянные величины определялись на основе паспортных данных крана. Силовые факторы управления механизмами принимались в соответствии с диаграммами реостатного пуска их двигателей в функции времени. Тормозные усилия принимались постоянными без учета электрического торможения. Силы сопротивления в механизме вылета стрелы от неуравновешенности собственного веса стрелового устройства и веса груза аппроксимировались

аналитическими зависимостями в функции вылета стрелы крана.

Коэффициенты аэродинамического сопротивления стреловой системы и коэффициенты момента в функции угла атаки ветра при изменении вылета стрелы и угла поворота крана были определены экспериментально в (Ерофеев и др., 1976) и аппроксимированы аналитическими зависимостями.

Статистические параметры ветрового потока и реализации динамической составляющей скорости ветра принимались по исследованиям, приведенным в статье (Подобед, 2006). Средние скорости ветра изменялись от 15 до 20 м/с; коэффициенты порывистости от  $1,05 \leq K_n \leq 1,45$ , а продолжительность порывов  $5 \leq \tau \leq 40$  с.

Исследование кранов проводилось для характерных циклов их работы. Основные геометрические параметры цикла, которые являются одновременно и начальными условиями, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Основные геометрические параметры рабочего цикла крана

$l_0$ , м	$l_k$ , м	$\rho_0$ , м	$\rho_{min}$ , м	$\rho_k$ , м	$\varphi_0$ , рад (град)	$\varphi_k$ , рад (град)	$\varphi_k - \varphi_0$ , рад (град)
28	20	20	10-11	20	0,4 (23)	2,85 (160)	2,45 (137)

Исследования проводились для трех случаев работы крана: работа без влияния ветра; рабочий ход (с грузом) против ветра и рабочий ход по ветру. Вес груза  $Q$  и его наветренная площадь  $F_r$  принимались по существующей номенклатуре перегружаемых грузов в портах. При этом отношение наветренной площади груза к его весу – коэффициент парусности груза  $K_F$  – изменялось от 0,5 до 2,0.

В результате моделирования работы крана при ветре исследовались в функции времени следующие показатели их работы: максимальные и эквивалентные нагрузки в механизмах вылета стрелы и поворота крана; скорости точки подвеса и самого груза; углы раскачивания груза в пространстве; управляемость (время переходных процессов) крана. Перечисленные показатели исследовались в зависимости от величины средней скорости ветра и динамической ее составляющей, а также коэффициента парусности грузов и направления ветра.

### 3.2. Максимальные эксплуатационные нагрузки в механизмах вылета стрелы и поворота крана при воздействии ветра

Характерные кривые изменения нагрузок в функции времени в механизмах вылета стрелы  $P_\rho(t)$  и поворота  $M_\varphi(t)$  крана для указанных случаев его работы показаны на рис. 1. На основании расчетов получены максимальные нагрузки  $P_\rho^{max}$ ,  $M_\varphi^{max}$ , появляющиеся соответственно в механизме вылета стрелы и поворота крана во время рабочего полуцикла для различных значений скорости ветра и коэффициентов парусности. Определены коэффициенты пульсаций  $K_n$ , при которых эти нагрузки возникают. Приведены коэффициенты превышения  $K_\rho$ ,  $K_\varphi$  соответственно максимальной нагрузки  $P_\rho^{max}$  и  $M_\varphi^{max}$  при наиболее неблагоприятной пульсации ветра по отношению к максимальной нагрузке  $P_\rho$  и  $M_\varphi$ , определяемых при постоянной (средней) скорости ветра.

Исследованиями установлено, что максимальные эксплуатационные нагрузки в механизмах крана в течение цикла появляются в период переходных процессов и определяются в основном характером управления краном и настройкой пусковой аппаратуры двигателей (регулировкой тормозов).

Влияние ветра на максимальные нагрузки в механизме вылета крана заметно проявляется при средних скоростях ветра свыше 15 м/с, а его пульсаций на механизмы вылета и поворота – свыше 18 м/с.

Влияние статической составляющей ветра с учетом возможных пульсаций на механизм вылета крана при работе на грузах с  $0,5 \leq K_F \leq 1,0$  увеличивает нагрузки в 1,3-1,5 раза, а на грузах с  $1,0 \leq K_F \leq 2,0$  соответственно 1,5-1,8. Влияние же средних скоростей ветра на максимальные нагрузки в механизме поворота крана при исследуемых характерных циклах работы незначительно.

Динамическое воздействие ветра по сравнению со статическим воздействием увеличивает максимальные нагрузки в механизмах вылета и поворота крана при работе на грузах с  $0,5 \leq K_F \leq 1,0$  в 1,15 раза, а на грузах с  $1,0 \leq K_F \leq 2,0$  в 1,20 раза. Изменение наветренной площади груза от 5 до 20 м<sup>2</sup> увеличивает максимальные нагрузки кранов на 10-15 %.

Максимальные эксплуатационные нагрузки в механизмах крана при работе против ветра возрастают с увеличением средней скорости ветра, коэффициента пульсаций и парусности грузов, однако при исследуемых параметрах ветрового воздействия и циклах работы они остаются в пределах допустимых, т.е. при обычных рабочих циклах по условиям максимальных эксплуатационных нагрузок работа крана допускается при средних скоростях ветра 20 м/с с порывами до 28 м/с. С учетом возможного сочетания максимальных нагрузок на механизмы кранов при их работе в наихудших условиях допустимая средняя скорость ветра составляет 18 м/с с порывами до 22 м/с.

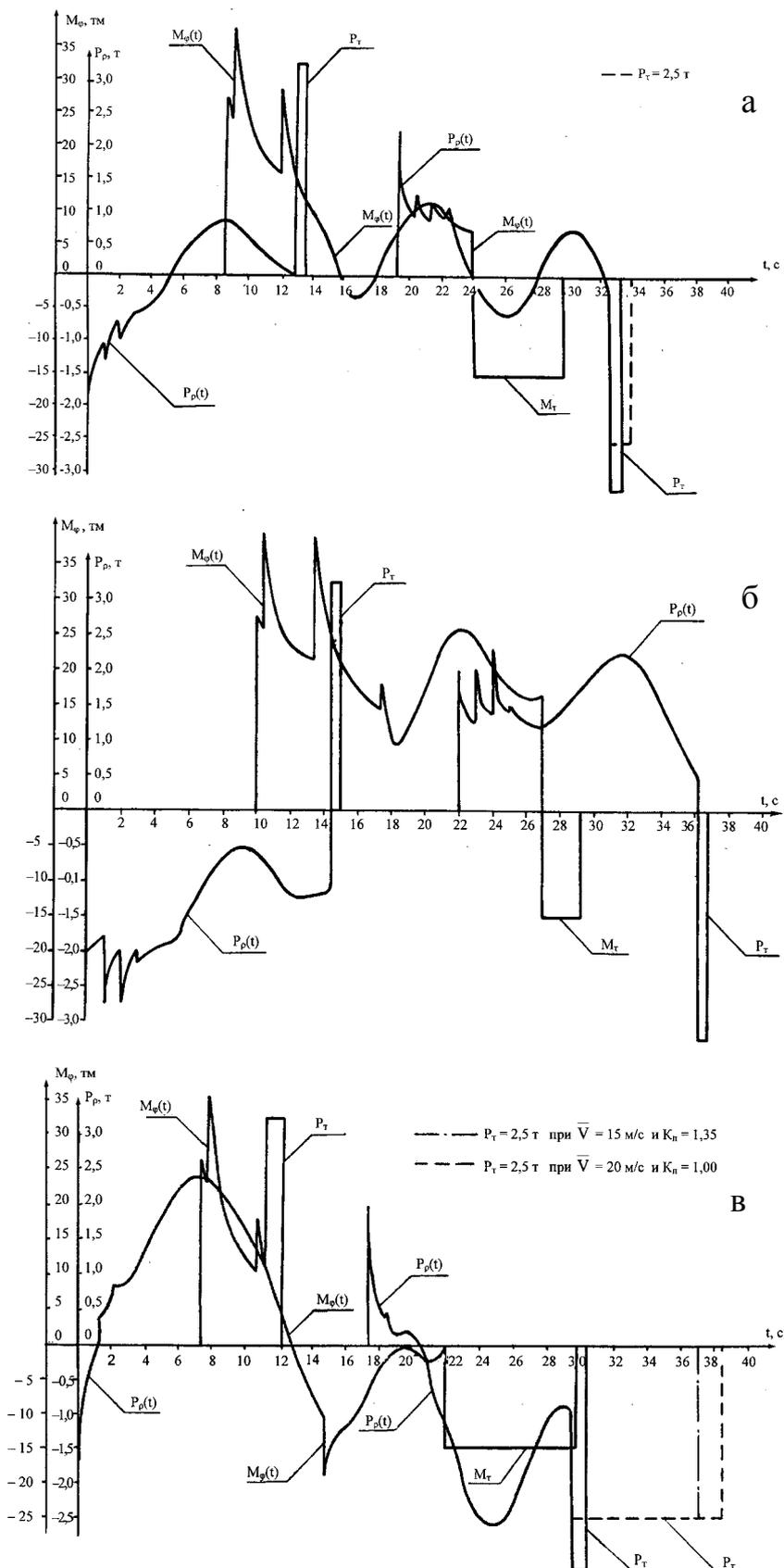


Рис. 1. Нагрузки в механизмах поворота и вылеты стрелы крана при работе в грейферном режиме  
 а) без влияния ветра, б) против ветра, в) по ветру.  $\bar{V} = 20 \text{ м/с}$ ,  $Q = 10 \text{ т}$ ,  $F_r = 5 \text{ м}^2$

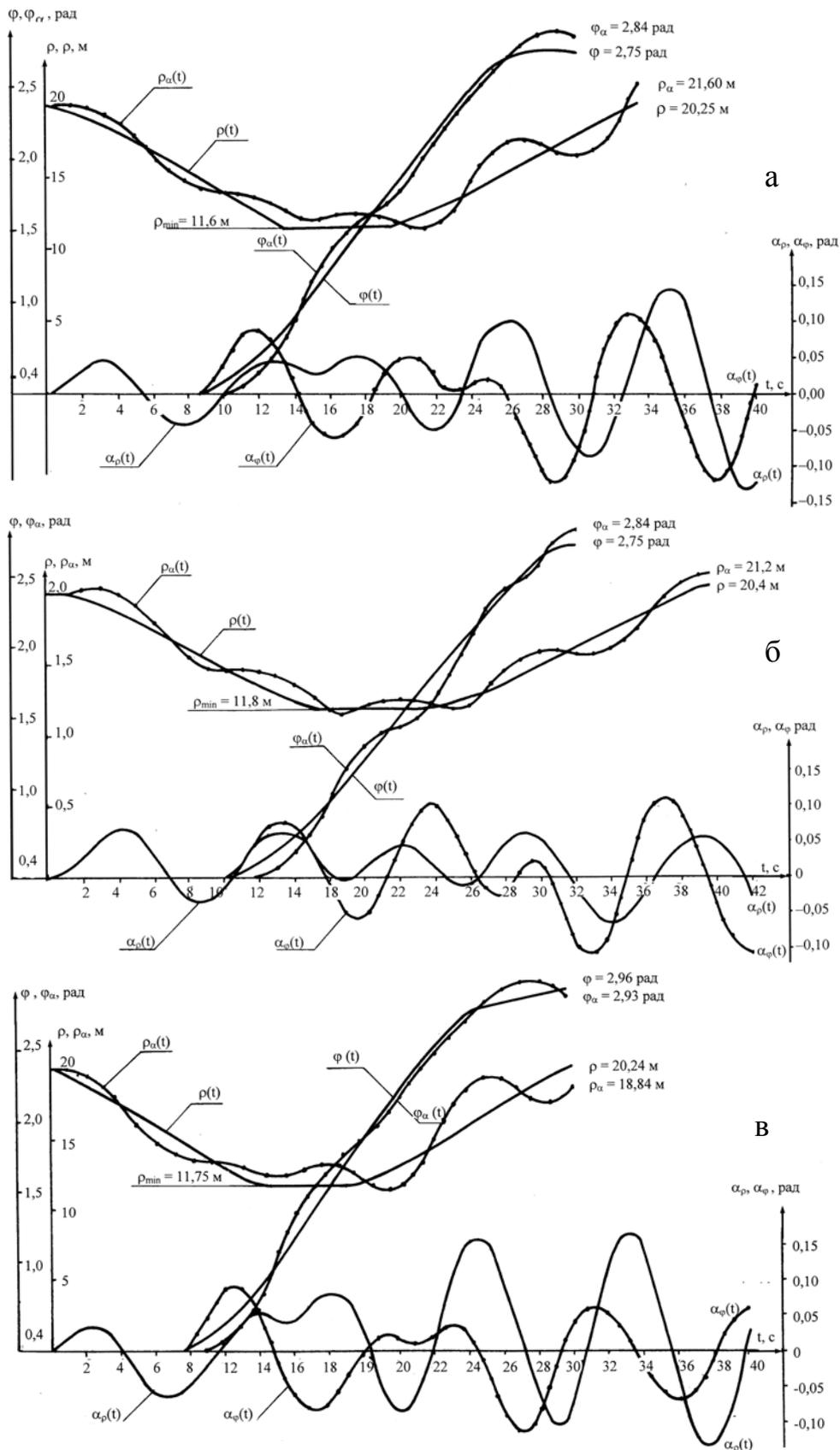


Рис. 4. Геометрические показатели работы крана в грейферном режиме  
 а) без влияния ветра, б) против ветра, в) по ветру.  $\bar{V} = 20$  м/с,  $Q = 10$  т,  $F = 5$  м<sup>2</sup>,  $l = 20$  м

### 3.3. Эквивалентные нагрузки в механизмах вылета стрелы и поворота кранов при воздействии ветра

Допускаемые нагрузки на двигатели механизмов крана, обеспечивающие их нормальную работу по условиям нагрева, определяются:

$$P_3 \leq [P_3], \quad (13); \quad M_3 \leq [M_3], \quad (14)$$

где  $P_3$  и  $M_3$  – эквивалентная нагрузка на двигатель механизма изменения вылета стрелы и эквивалентный момент на двигатель механизма поворота крана за время цикла работы крана, соответственно, определяются путем решения системы уравнений (8) с последующим вычислением по формулам (15) и (16),

$$P_3 = \sqrt{(P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n)} / T_{\text{ц}}, \quad (15); \quad M_3 = \sqrt{(M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n)} / T_{\text{ц}}, \quad (16)$$

где  $P_1, P_2, \dots, P_n$  – суммарные нагрузки от всех сил, включая силу ветра, на двигатель механизма вылета стрелы, действующие в течение времени соответственно  $t_1, t_2, \dots, t_n$ ;  $t_1, t_2, \dots, t_n$  – шага интегрирования;  $M_1, M_2, \dots, M_n$  – суммарные моменты от всех сил, включая момент от силы ветра, на механизм поворота крана, действующие в течение времени соответственно  $t_1, t_2, \dots, t_n$ ;  $[P_3]$  и  $[M_3]$  – соответственно допускаемая эквивалентная нагрузка на двигатель механизма вылета стрелы и допускаемый эквивалентный момент на двигатель механизма поворота крана – определяются согласно паспортным данным крана;  $T_{\text{ц}}$  – общее время рабочего цикла крана.

Определены эквивалентные нагрузки, действующие на механизм изменения вылета стрелы в течение цикла работы крана в зависимости от средней скорости ветра,  $K_n, K_F$  и направления ветра. Установлены коэффициенты превышения  $K_p$ , максимального эквивалентного усилия  $P_3^{\text{max}}$  при наиболее неблагоприятной пульсации по отношению к эквивалентному усилию  $P_3$ , определяемому при средней скорости ветра, и коэффициенты пульсаций ветра, при которых возникают  $P_3^{\text{max}}$ . Аналогичные эквивалентные нагрузки определены для механизма поворота крана.

Из расчетов следует, что на эквивалентные нагрузки механизмов крана существенно влияет величина средней скорости ветра. Эквивалентные нагрузки практически пропорциональны ей. Пульсации ветра при средних скоростях от 15 до 20 м/с увеличивают эквивалентные нагрузки в механизме вылета стрелы крана при работе на грузах с  $0,5 \leq K_F \leq 1,0$  соответственно в среднем в 1,2 раза, а на грузах с  $1,0 \leq K_F \leq 2,0$  – в 1,3 раза. Влияние пульсаций на величину эквивалентных нагрузок в механизме поворота крана незначительно. Изменение наветренной площади грузов от 5 до 20 м<sup>2</sup> увеличивает эквивалентные нагрузки в механизме поворота в среднем на 20 %.

Направление ветра практически не влияет на величину эквивалентных нагрузок в механизме изменения вылета стрелы крана, а для механизма поворота величина эквивалентных нагрузок при работе крана по ветру меньше в среднем на 20-30 % по сравнению с нагрузками при работе против ветра. По условиям нагрева электродвигателей механизмов крана при продолжительности включения ПВ = 40 % для вылета и ПВ = 60 % для поворота (паспортные значения) допустимая средняя скорость ветра для рабочего состояния крана с учетом возможных пульсаций при перегрузке грузов с коэффициентом парусности  $K_F \leq 0,5$  составляет 17 м/с.

На рис. 2-3 приведены графики допускаемых средних скоростей ветра с учетом возможных пульсаций по условиям эквивалентных нагрузок в механизмах крана для худших случаев их работы в зависимости от режима работы и парусности грузов.

### 2.4. Влияние ветра на скорости движения механизмов и груза

График скоростей движения механизмов вылета стрелы и поворота крана соответственно по координатам  $\rho$  и  $\varphi$  в функции времени имеет трапециевидную форму для всех трех случаев работы

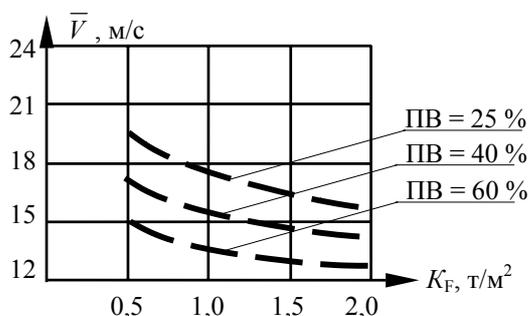


Рис. 2. Допустимые скорости ветра с учетом пульсаций для механизма вылета стрелы в зависимости от  $K_F$  и ПВ %

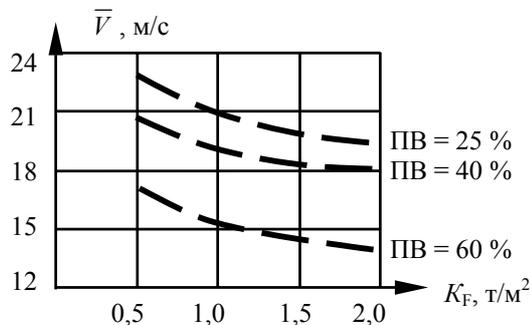


Рис. 3. Допустимые скорости ветра с учетом пульсаций для механизма поворота крана в зависимости от  $K_F$  и ПВ %

крана с грузом: без ветра, против ветра и по ветру. Изменение скоростей механизмов при их разгоне происходит достаточно плавно. Продолжительность ступеней разгона скоростей механизмов соответствует времени переключения электродвигателей с одной механической характеристики на другую. Изменение скоростей движения груза в функции времени соответственно по координатам  $\rho_\alpha$  и  $\varphi_\alpha$  отражает синусоидальный колебательный процесс относительно скорости движения точки подвеса груза. Пределы изменения периодов колебаний скоростей груза по координатам  $\rho_\alpha$  и  $\varphi_\alpha$  составляют: без ветра 6-10 с, против ветра 7-11 с, по ветру 6-10 с.

Как следовало ожидать, периоды колебаний скоростей груза по координатам  $\rho_\alpha$  и  $\varphi_\alpha$  практически одни и те же и от направления ветра мало зависят. Направление ветра влияет на скорости движения механизмов и груза – в одном случае замедляет их при движении против ветра, а в другом – увеличивает при движении по ветру.

При работе крана с грузом против ветра скорости механизмов практически не зависят от скорости ветра, его порывистости и парусности грузов (превышение скоростей составляет 3-5 %).

При работе кранов с грузом по ветру на рабочие скорости механизмов влияние в основном оказывает величина средней скорости ветра. Превышение номинальных скоростей механизмов кранов в этом случае составляет в среднем 20-30 %. Влияние пульсаций ветра и парусности грузов незначительно и составляет 5-10 %. Значительное превышение рабочих скоростей механизмов сверх номинальных объясняется тем, что в математической модели (8) не учитывались дополнительные управляющие воздействия со стороны крановщика – отключение двигателей и периодическое их торможение.

Исследование рабочих циклов крана при средних скоростях ветра до 20 м/с с возможными пульсациями и парусностью груза показало, что ограничений на работу крана по условиям превышения или уменьшения скоростей движения механизмов с грузом или без груза не накладывается.

## 2.5. Углы раскачивания груза в пространстве при воздействии ветра

На рис. 4 приведены характерные кривые движения точки подвеса груза "а" по координатам ( $\rho$ ,  $\varphi$ ) и самого груза ( $\rho_\alpha$ ,  $\varphi_\alpha$ ), а также углов раскачивания груза ( $\alpha_\rho$ ,  $\alpha_\varphi$ ) в функции времени для трех случаев работы крана: без влияния ветра, при работе крана с грузом против ветра и работе крана с грузом по ветру. Характер колебательного процесса груза по координатам  $\rho_\alpha$ , и  $\varphi_\alpha$  аналогичен колебательному процессу его скоростей.

Максимальные углы раскачивания грузов в пространстве  $\alpha_{max}$  практически не зависят от веса груза (различие составляет 0,01-0,02 рад, или 4-8 %), а зависят от парусности груза. Получены значения максимальных углов раскачивания грузов по координатам  $\rho$  и  $\varphi$ , появляющиеся в течение цикла работы крана, и максимальные углы раскачивания груза в пространстве  $\alpha_{max}$ . Углы раскачивания груза исследовались в зависимости от величины средней скорости ветра, его порывистости, направления ветра и парусности груза.

Проследить "чистое" влияние ветра на поведение груза в пространстве можно, очевидно, проследив изменение  $\alpha_{max}$  в зависимости от парусности груза при работе кранов по ветру. Для этих случаев на рис. 5 графически представлены зависимости  $\alpha_{max}$  от средней скорости ветра, парусности груза и пульсаций ветра  $K_n$ . Как следует из рисунка, зависимости  $\alpha_{max}$  от  $K_n$  практически линейны. С увеличением парусности груза углы раскачивания грузов увеличиваются.

Исследованиями установлено, что при равных условиях управления механизмами для грузов с  $K_F \leq 0,5$  влияние ветра на раскачивание груза незначительно (около 10 %), а для грузов с  $0,5 \leq K_F \leq 1,0$  это влияние на  $\alpha_{max}$  составляет в среднем 25 %, а грузов с  $1,0 \leq K_F \leq 1,5$  соответственно 30-40 % и  $1,5 \leq K_F \leq 2,0$  – 40-70 %.

При хорошей управляемости крана возрастание  $\alpha_{max}$  в пределах 20-30% нетрудно погасить за счет дополнительных управлений крановщика. Поэтому можно считать допустимой работу крана по условиям раскачивания груза при средних скоростях ветра 20 м/с с порывами до 28 м/с на грузах, имеющих  $K_F \leq 1,0$ , при ветре 18 м/с с порывами до 26 м/с на грузах с  $1,0 \leq K_F \leq 1,5$  и 15 м/с с порывами до 22 м/с на грузах с  $1,5 \leq K_F \leq 2,0$ .

## 3.6. Управляемость кранов при ветре

Под управляемостью крана понимается скорость его реакции на управления крановщика, исключающая произвольное движение под воздействием внешних нагрузок и обеспечивающая своевременную остановку механизмов, что дает возможность крановщику погасить раскачивание груза и нацелить его в требуемое место. Возможная неточность реализации управляющего сигнала при ручном управлении особого значения не имеет, т.к. при удовлетворительной управляемости она может быть компенсирована дополнительными управляющими воздействиями. Иными словами, в условиях

повышенной ветровой нагрузки для устранения раскачивания или нацеливания груза потребуются большее число включений соответствующих механизмов. Применительно к задаче настоящего исследования степень управляемости крана можно определять длительностью переходных процессов в механизмах.

Следует особо отметить, что если в процессе пуска двигателей механизма вылета стрелы их пусковые моменты изменяются автоматически в зависимости от времени и жесткости пусковых характеристик, то в процессе торможения, особенно механизмов вылета стрелы, тормозные усилия остаются постоянными. Поэтому при одном и том же тормозном усилии время торможения механизма вылета без ветра составляет 1,5 с, а по ветру – 8,6 с, а тормозные пути механизма изменяются в 3-4 раза. В связи с этим необходимо производить регулировку тормозов для худших случаев их работы.

При исследуемых характерных циклах работы крана, параметрах ветрового потока и груза время переходных процессов механизмов изменяется в допустимых пределах. Установлено, что время переходных процессов зависит от направления и величины средней скорости ветра, динамических характеристик крана и практически мало зависит от порывистости ветра и парусности грузов. Для характерных циклов применительно к рассматриваемому типу крана допустимая скорость ветра рабочего состояния по условию управляемости составляет 20 м/с с порывами до 28 м/с.

При возможном сочетании нагрузок на механизмы крана при их работе в наихудших условиях допустимая средняя скорость ветра составляет 18 м/с с порывами до 22 м/с. При этом время переходных процессов механизмов вылета составляет 4-6 с, а поворота на вылете 22-25 м – 10-15 с.

#### 4. Заключение

Определены основные показатели работоспособности портального крана и сформулированы условия, ограничивающие их величину при воздействии ветровых нагрузок.

Разработана математическая модель режимов работы стреловых поворотных кранов с тремя независимыми совмещенными рабочими движениями (подъем, вылет и вращение) при динамическом воздействии ветра.

В результате теоретических исследований установлено, что основными показателями работоспособности портального крана при ветре являются эквивалентные нагрузки в механизмах, углы раскачивания груза и управляемость крана. Для характерных циклов работы крана с ограничениями на вылет стрелы и режим работы допустимые скорости ветра составляют при переработке грузов с коэффициентом парусности  $0,5 \leq K_F \leq 1,0$  – 20 м/с с порывами до 28 м/с, для грузов с  $1,0 \leq K_F \leq 1,5$  – 18 м/с с порывами до 26 м/с и грузов с  $1,5 \leq K_F \leq 2,0$  – 15 м/с с порывами до 22 м/с. Для циклов работы кранов без ограничений допустимая скорость ветра при переработке грузов с  $0,5 \leq K_F \leq 1,0$  составляет 18 м/с с порывами до 22 м/с, а для грузов с  $1,0 \leq K_F \leq 2,0$  – 15 м/с с порывами до 18 м/с.

#### Литература

- Ерофеев Н.И., Лисовой П.Я., Подобед В.А. Экспериментальное определение аэродинамических характеристик модели портального крана. *Известия ВУЗов. Машиностроение*, № 5, с.127-131, 1976.  
 Подобед В.А. Математическое моделирование ветровых нагрузок на портовые портальные краны. *Вестник МГТУ*, т.9, № 2, с.318-331, 2006.  
 Правила по технике безопасности в рыбных портах. МРХ СССР. Л., 250 с., 1970.

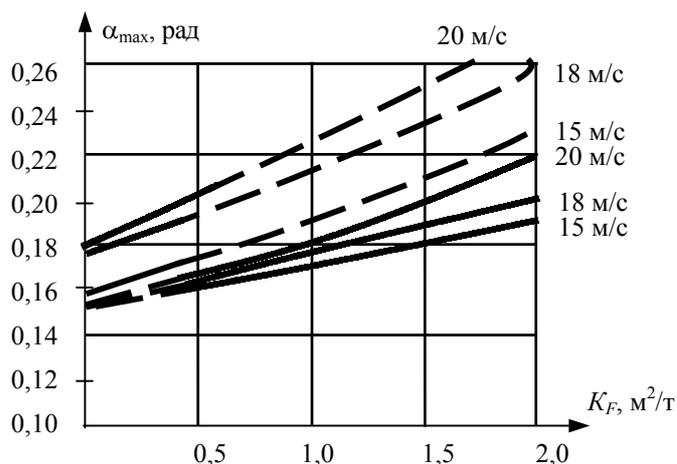


Рис. 5. Максимальные углы отклонения груза в пространстве при работе крана по ветру: сплошная линия – при отсутствии порывов ветра; штрих-пунктирная – при наличии порывов ветра