

Математическое моделирование ветровых нагрузок на портовые порталные краны

В.А. Подобед

Судоводительский факультет МА МГТУ, кафедра управления судном и промышленного рыболовства

Аннотация. Составлена расчетная схема нагрузок на портовый порталный кран с учетом воздействия ветровой нагрузки. Расчетная схема крана с грузом, как материальная система с пятью степенями свободы, представлена в цилиндрической системе координат, которые непосредственно характеризуют параметры рабочего процесса крана. Ветровая нагрузка представлена в виде суммы двух ее составляющих: статической – соответствующей средней скорости ветра, осредненной за 2-х минутный интервал времени, и динамической – соответствующей пульсационной составляющей, представляемой тригонометрическими функциями – синусоидами со случайными амплитудами и периодами пульсаций. Установлена статистическая зависимость между продолжительностью пульсаций и коэффициентами порывистости ветра. Получены расчетные аналитические зависимости ветровой нагрузки на кран с грузом с учетом динамической ее составляющей, изменения скоростного напора ветра по высоте крана и собственных скоростей движения механизмов в функции обобщенных координат – угла поворота и вылета стрелы крана.

Abstract. The loading diagram on port bridge crane accounting wind load has been made. The wind load has been represented as a sum of two constituents: statistic and dynamic ones. The statistic dependence between the pulsation duration and gustiness coefficients has been calculated. The computation analytical dependencies of wind load on a crane with weight accounting its dynamic constituent have been obtained.

1. Введение

Существующая методика расчета портовых порталных кранов на ветровую нагрузку ГОСТ 1451-77 "Краны грузоподъемные. Нагрузка ветровая" (ГОСТ 1451-77..., 1978) не учитывает динамический характер ветровой нагрузки. При этом расчеты на ветровую нагрузку для рабочего состояния крана выполняются для определенных его положений, а коэффициенты аэродинамического сопротивления определяются для каждой отдельной части крана по типовым ее элементам в зависимости от угла атаки ветрового потока. Отсутствие аналитических зависимостей ветровой нагрузки в функции обобщенных координат движения крановых механизмов не позволяет выполнить исследования влияния ветровых нагрузок на основные показатели работоспособности кранов и реально определить допустимые скорости ветра для их рабочего состояния в зависимости от типа крана, технологии перегрузочных работ и парусности грузов. Существующее противоречие между принятой в расчетах ветровой нагрузкой на кран по характеру ее воздействия и методикой измерения скорости ветра в морских портах (в метеосводках указывается средняя скорость ветра и максимальные ее порывы) не позволяет выявить имеющиеся резервы кранов при их использовании при повышенных ветровых нагрузках и обеспечивать безопасность их работы.

Основными задачами исследования являются:

- исследование и оценка основных параметров ветровой нагрузки по существующим литературным источникам, метеорологическим данным морских портов и экспериментальным записям;
- математическое описание динамической составляющей ветровой нагрузки;
- составление расчетной схемы воздействия ветровой нагрузки на порталный кран с грузом с учетом влияния скоростей движения крановых механизмов и изменения скоростного напора ветра по высоте крана;
- составление расчетных аналитических зависимостей ветровой нагрузки на кран с грузом с учетом динамической ее составляющей, изменения скоростного напора ветра по высоте крана и собственных скоростей движения механизмов в функции обобщенных координат их движения.

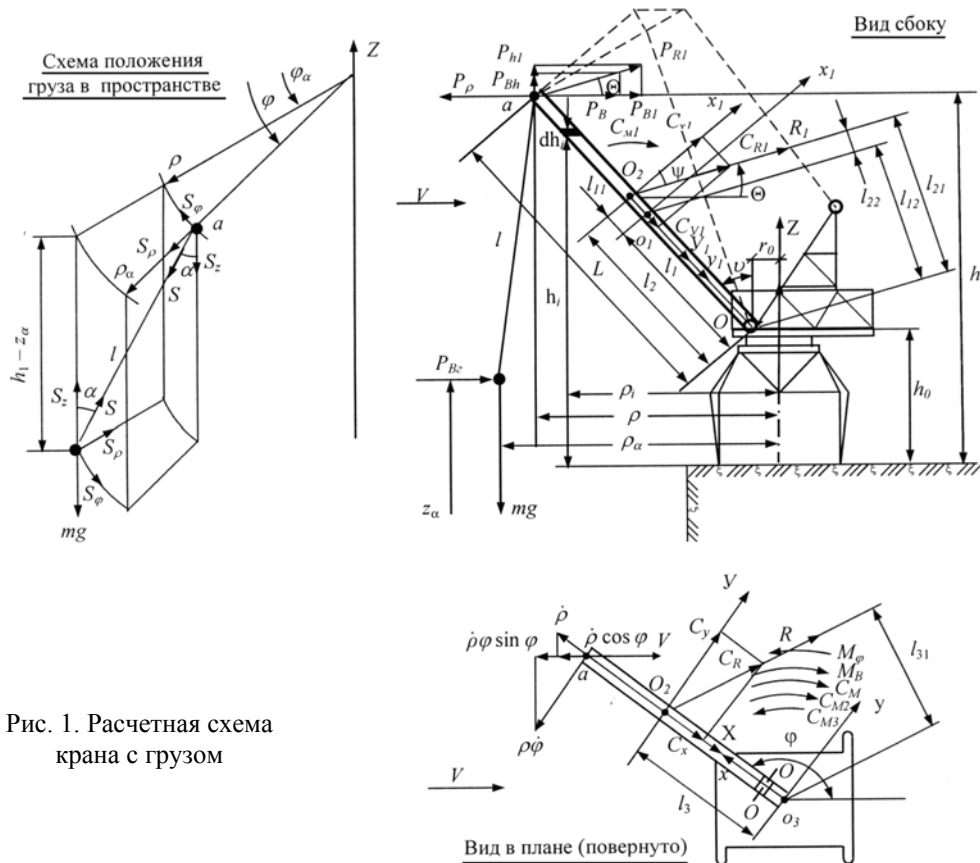


Рис. 1. Расчетная схема крана с грузом

2. Результаты моделирования и их обсуждение

2.1. Расчетная схема крана и принимаемые допущения

Система стрелового portalного крана обеспечивает перемещение груза работой крановых механизмов: подъем груза, вращение крана, изменение вылета стрелы. Для материальной системы с пространственными колебаниями груза (как материальной точки), которые могут считаться малыми, уравнения движения можно получить в цилиндрических координатах. Движение крана характеризуется траекторией точки подвеса груза, расположенной на верхнем конце стрелового устройства. Координатами этой точки (рис. 1) являются: φ – угол поворота крана, ρ – вылет стрелы и h – высота нока стрелы (у шарнирно-сочлененных стрел h может считаться постоянной). Эти координаты определяют главные геометрические параметры рабочего процесса перемещения точки "а" подвеса груза. Для удобства теоретических исследований начало отсчета угла поворота φ производится от первоначального положения плоскости качания стрелы, совпадающего с направлением ветра.

Груз весом mg подвешен на гибкой упругой нити (канате) длиной l , которая отклоняется от вертикали на угол α , в результате ускорений точки "а" и воздействия ветровой нагрузки на поворотную часть крана с грузом. Координатами положения груза в пространстве будут φ_α , ρ_α , z_α . Уравнения движения точки "а" и груза будут выражены через эти координаты как функции времени при условии принятия приведенных ниже допущений.

Любое деформируемое тело является системой с множеством степеней свободы. Если массами одних элементов пренебречь (масса каната и др.), а другие рассматривать как абсолютно жесткие тела (основание подкрановых путей, платформа, каркас и некоторые другие части и детали крана), то система будет иметь конечное число степеней свободы. В этом случае степенями свободы системы будут указанные выше пять координат: $\psi_i = \varphi, \rho, z_\alpha, \varphi_\alpha, \rho_\alpha$. При этом не учитываются: упругие деформации элементов системы крана (перемещение конца стрелы, упругие смещения в звеньях привода крановых механизмов, упругое удлинение грузового каната), просадка подкрановых путей, перемещения вследствие изменения величин скольжения электродвигателей, зазоры в кинематических парах механизмов и устройств ввиду их малости на несколько порядков по сравнению с основными координатами.

Полагая углы α отклонения груза в пространстве малыми ($5-10^\circ$ при нормальной работе и $10-20^\circ$ для некоторых возможных случаев разгона и торможения механизмов), можно принять $\sin \alpha \approx \alpha$,

$\cos \alpha \approx 1$, при этом относительная погрешность для этих углов составит 1-2 %.

Для решения задач динамики систем с несколькими степенями свободы наиболее универсальным методом являются уравнения Лагранжа второго рода. Эти уравнения составляются на основе обобщенных координат (ψ_i) и соответствующим им обобщенных сил (Q_i). В связи с принятой системой обобщенных координат нагрузки и массы приводятся: у механизма подъема – к окружности грузового барабана, у механизма изменения вылета – к точке подвеса груза "а", у механизма поворота – к оси вращения крана z. Приведение нагрузок и движущих усилий производится по уравнениям работ, а приведение масс и моментов инерции – на основе уравнений кинетической энергии.

Математическая модель режима работы порталных кранов без учета сил ветра получена профессором *Ерофеевым Н.И.* (1967). Ветровая нагрузка является одной из составляющих обобщенных сил, действующих на кран с грузом. Характер этой нагрузки может быть определен на основе статистических характеристик ветрового потока и анализа ее воздействия на работу порталных кранов (*Зубко, Подобед, 1982; Подобед, 1982; Подобед, Подобед, 1990*).

2.2. Основные параметры ветрового воздействия

Ветровое воздействие на кран характеризуется следующими основными параметрами: средней скоростью ветра, осредненной за определенный интервал времени; максимальной скоростью ветра с повторяемостью за определенный период времени; порывистостью ветра (порывами); продолжительностью порывов (периодами) и направлением ветра.

Основной характеристикой ветра является его средняя скорость. В России на метеостанциях средняя скорость ветра измеряется за 2-х минутный интервал времени на высоте 10 м над поверхностью земли. Она является исходной в расчетах кранов на ветровую нагрузку. За рубежом принят в основном 10 минутный интервал осреднения, который впоследствии стал применяться и на метеостанциях России. По данным (*Труды конференции...*, 1976), время действия средних скоростей ветра, превышающих 20 м/с, в среднем по всем ветровым районам и, соответственно, по всем морским портам России, составляет около 0,4 %. Поэтому целесообразно ограничиться исследованиями работы портовых кранов при средних скоростях ветра до 20 м/с включительно.

Следующей характеристикой ветрового воздействия является максимальная скорость ветра с повторяемостью один раз в 2 мин, 10 мин, один час, три часа, один раз в год или несколько лет. Следует отметить, что максимальные скорости ветра с периодом разового действия сильного ветра за год или несколько лет в районах установки кранов используются в расчетах собственной устойчивости кранов, а максимальные скорости ветра с более частой повторяемостью будут учитываться в исследованиях основных показателей работоспособности порталных кранов и их грузовой устойчивости против опрокидывания.

Наиболее опасным параметром ветрового воздействия является его порывистость (пульсации ветра). Под порывом ветра понимается всякое колебание скорости ветра от минимума к максимуму и обратно независимо от его величины. Характеристикой порывистости ветра (горизонтальной составляющей) является коэффициент порывистости K_n , равный отношению максимумов скорости в порывах V_{\max} к средней скорости \bar{V} :

$$K_n = V_{\max} / \bar{V}. \quad (1)$$

На рис. 2 приведена запись скорости порывистого ветра, где можно выделить отдельные порывы, имеющие разные амплитуды и частоты. Установлено (*Луговский, 1976*), что высокочастотные, весьма кратковременные пульсации (продолжительностью менее 1 с) обычно не оказывают заметного влияния на суммарное силовое давление ветра. Кроме того, инерционность существующих ветроизмерительных приборов приводит к неизбежной ошибке в записях таких пульсаций. Поэтому скорости ветра V_{\max} и V_{\min} определяются не мгновенным значением, а некоторым средним значением за небольшой (не более нескольких секунд) интервал времени, обычно $\tau = 3 \div 5$ с.

Таким образом, скорость ветра представляется в виде суммы статической и динамической составляющих

$$V(t) = \bar{V} + \Delta V(t), \quad (2)$$

где \bar{V} – статическая составляющая скорости ветра, соответствующая осредненной скорости ветра за 2-х минутный интервал времени; $\Delta V(t)$ – динамическая составляющая скорости ветра, случайный стационарный процесс, описываемый методами случайных функций.

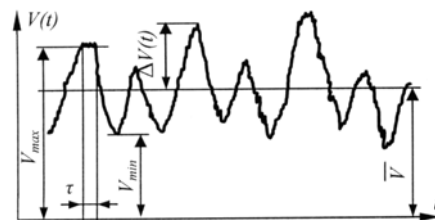


Рис. 2. Кривая изменения скорости порывистого ветра

В задачах, связанных с исследованием основных показателей работы кранов, необходимо выделять два типа ветров: устойчивый порывистый ветер и шквалистый ветер. При устойчивом ветре изменение скорости во времени носит характер кратковременных, продолжительностью не более нескольких секунд пульсаций, вокруг примерно постоянного среднего значения. При шквалистом ветре, помимо кратковременных пульсаций, происходит резкое нарастание средней скорости ветра, определенной за достаточно продолжительный промежуток времени. Ниже рассматриваются статистические характеристики устойчивого порывистого ветра.

2.3. Вероятностная оценка динамической составляющей ветровой нагрузки по существующим источникам

Динамическая составляющая ветровой нагрузки обусловлена порывистостью ветра, статистические характеристики которой определяются по результатам натурных измерений скорости ветра. Для достаточно длинной реализации записей значений скорости ветра во времени получается набор различных значений коэффициентов порывистости, которые можно оценить с помощью вероятностных характеристик. Коэффициенты порывистости определяются по формуле (1) и зависят от максимальной и средней скоростей ветра, интервалов времени их осреднения и высоты крана.

Зависимость величины коэффициента порывистости K_n от величины средней скорости \bar{V} и интервала осреднения τ максимальной скорости ветра в порывах приведена по японским данным в табл. 1 (Луговский, 1976).

Как следует из табл. 1, интервал осреднения τ в пределах до 10 с при средних скоростях ветра до 20 м/с включительно незначительно влияет на коэффициент порывистости K_n , в связи с чем рекомендуется принимать пятисекундный интервал осреднения максимальной скорости ветра в порывах.

На рис. 3 показана зависимость коэффициента порывистости от средней скорости ветра (Луговский, 1976), где интервал осреднения максимальной скорости ветра в порывах составлял 5 с, а средняя скорость ветра \bar{V} осреднялась за 10 мин. При средней скорости ветра свыше 15 м/с значение коэффициента K_n практически не превышает 1,4, и постепенно стабилизируется вокруг среднего значения, равного 1,23.

Таблица 1. Зависимость коэффициента порывистости от средней скорости ветра

\bar{V} , м/с	Интервал осреднения τ , с		
	2	5	10
10	1,44	1,41	1,38
20	1,36	1,32	1,31
30	1,29	1,27	1,26
40	1,26	1,24	1,26

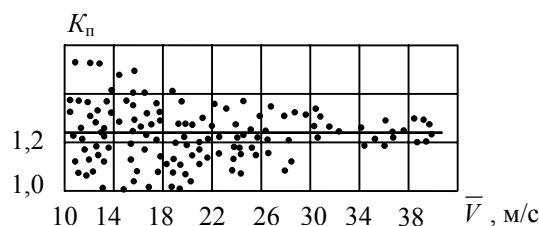


Рис. 3. Зависимость коэффициента порывистости от средней скорости ветра

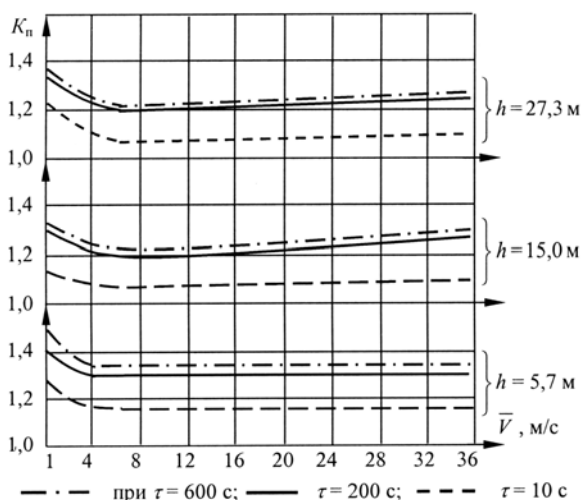


Рис. 4. Зависимость коэффициента порывистости от высоты и средней скорости ветра

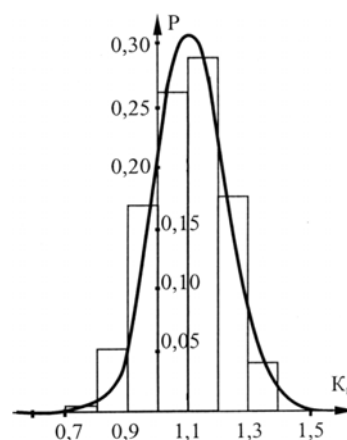


Рис. 5. Гистограмма и кривая распределения коэффициентов порывистости ветра

Зависимости коэффициентов порывистости от высоты и средней скорости ветра по данным Гоптарева Н.П. (Луговский, 1976), полученные по записям каспийских ветров в районе Нефтяных Камней, представлены на рис. 4. Средняя скорость ветра на уровнях 5,7; 15,0 и 27,3 м над уровнем моря осреднялась за 10, 200, 600 с. Значения коэффициента порывистости K_n при измерении скорости ветра на высотах 15 и 27,3 м хорошо совпадают с усредненной прямой K_n , приведенной на рис. 3, что позволяет при скоростях ветра свыше 15 м/с принимать среднее значение $K_n = 1,23$. Кроме того, из рис. 4 видно, что величина K_n уже с 15 м практически не зависит от высоты крана и интервала осреднения скорости ветра, начиная с 2-минутного интервала осреднения. Следовательно, $K_n = 1,23$ может быть принят постоянным по высоте крана при исследуемых скоростях ветра \bar{V} от 15 до 20 м/с.

Приведем количественные статистические характеристики коэффициентов порывистости ветра по данным Гоптарева Н.П., Маковой В.И. и Вакса А.И. (Луговский, 1976). На рис. 5 показаны гистограмма и кривая распределения коэффициентов порывистости ветра, определяемых по формуле (1). Значения порывов ветра относятся к внутриминутным интервалам осреднения скорости ветра с учетом минимальных скоростей ветра.

Повторяемость $K_n = 1,05-1,10$, составляет около 40 %. Повторяемость $K_n = 1,2-1,3$ не превышает 12 %, а обеспеченность порывов при $K_n > 1,3$ составляет менее 4 %. В самых сильных порывах $K_n = 1,6-1,7$, однако их повторяемость составляет всего лишь 0,002 %.

Результаты исследований характеристик ветров, проведенных японскими учеными (Луговский, 1976), позволяют установить статистическую зависимость между средними скоростями ветра, коэффициентами порывистости и продолжительностью порывов, которая приведена на рис. 6. По средней продолжительности порывы могут быть разделены на две группы: весьма кратковременные с продолжительностью $\tau = 100/\bar{V}$ и достаточно продолжительные с $\tau = 600/\bar{V}$. В диапазоне средних скоростей от 15 до 20 м/с продолжительность порывов для первой группы $K_n = 1,05-1,10$ составляет $\tau = 5-6$ с, а для второй группы $K_n = 1,3-1,4$, соответственно $\tau = 30-40$ с.

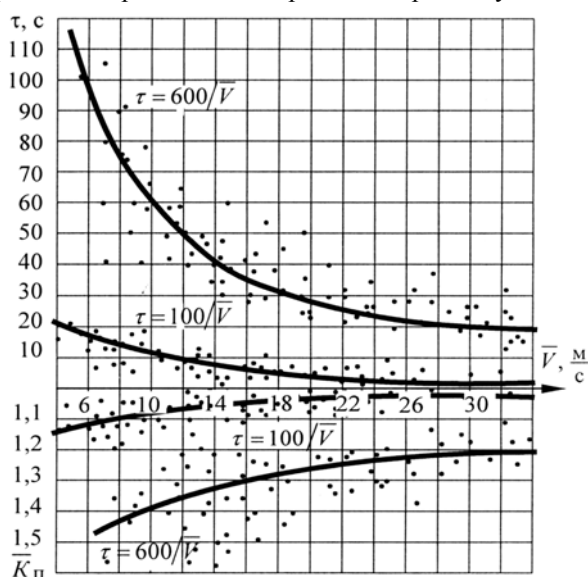


Рис. 6. Продолжительность порывов ветра по японским данным

2.4. Вероятностная оценка ветровой нагрузки по метео данным морских портов

2.4.1. Исследование скорости ветра по записям на метеостанции Ильичевск-порт

С целью изучения характера изменения скорости ветра во времени были проведены ее записи на метеостанции Ильичевск-порт. Запись ветра осуществлялась на бумажную ленту с помощью чернильного самописца от датчика скорости ветра – анемометра типа М-95М, прошедшего тарировку в аэродинамической трубе.

Общая продолжительность записи ветра 11.05.80 и 19.05.80 г. составляла 11,5 часов при средней скорости ветра 10-16 м/с. При этом продолжительность записи ветра со скоростью 15-16 м/с составляла 4,2 часа. В диапазоне средних скоростей от 15 до 16 м/с повторяемость максимальных порывов скорости ветра до 20-22 м/с составляла 3-5 раза в час, а их длительность – 60-100 с. Обеспеченность максимальных порывов составляет 5-10 %. Полученные результаты порывистости ветра хорошо совпадают с данными, приведенными на рис. 6.

Исследуя характер изменения скорости ветра во времени, следует выделить:

- достаточно продолжительные реализации скорости ветра, сравнимые с продолжительностью цикла работы крана, когда колебания скорости ветра незначительны (рис. 7а);

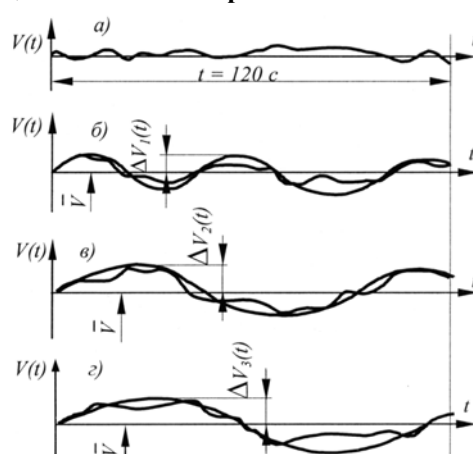


Рис. 7. Реализации скорости ветра, записанные на метеостанции Ильичевск-порт: синусоиды – математическое представление динамической составляющей скорости ветра во времени

– реализации скорости ветра, где величина скорости колеблется около среднего значения (рис. 7б, в, г).

В первом случае в расчетах скорость ветра можно принимать постоянной величиной, а во втором случае – в виде суммы статической \bar{V} и динамической $\Delta V(t)$ составляющих. Динамическая составляющая может быть представлена тригонометрическими функциями (синусоидами) со случайными амплитудами и периодами колебаний. Как следует из рисунков, такое представление скорости ветра не противоречит реальному воздействию ветровой нагрузки с определенным запасом в сторону увеличения. Подобное описание ветровой нагрузки принято некоторыми исследователями (*Труды конференции...*, 1976).

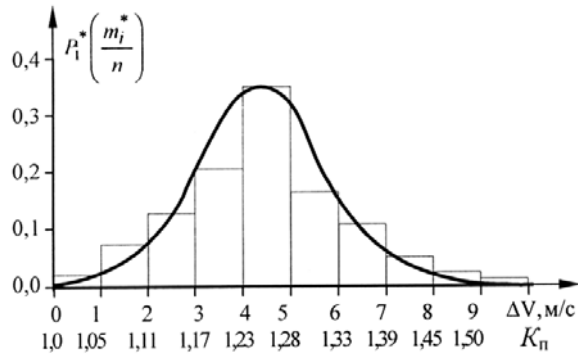


Рис. 8. Гистограмма и кривая распределения пульсации ветра

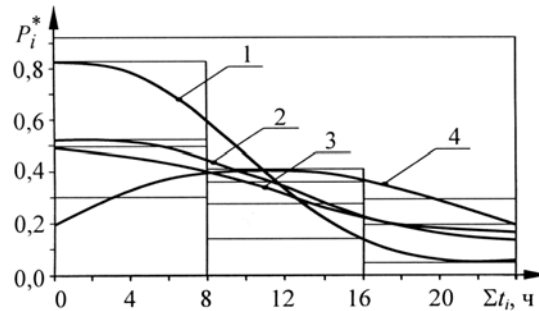


Рис. 9. Экспериментальные кривые статистического распределения времени действия ветра скоростью 15-20 м/с по одному и тому же его направлению по метео данным 11-ти морских портов.

Σt – суммарное время действия ветра в часах

2.4.2. Статистические характеристики динамической составляющей ветровой нагрузки

С целью изучения порывистости и устойчивости ветра по направлениям был проведен анализ действия средних скоростей ветра от 15 до 20 м/с в 11-ти морских портах за период с 01.09.77 г. по 01.09.78 г.: Ленинград, Измаил (II ветровой район); Ильичевск, Таллин (III ветровой район); Вентспилс (IV ветровой район); Новороссийск (V ветровой район); Амдерма, Ванино, Холмск, Корсаков (VI ветровой район); Провидения (VII ветровой район). 666 зарегистрированных случаев действия сильного ветра при средних скоростях от 15 до 20 м/с были подвергнуты статистической обработке, результаты которой представлены на рис. 8 и 9 (*Подобед, Подобед, 2004*).

Статистической обработке подвергались данные о максимальных порывах ветра, появившихся в течение одного часа, а на отдельных метеостанциях – между сроками наблюдений за 3 часа. При этом средняя скорость ветра определялась один раз в соответствующие сроки наблюдений с 2-х минутным, а на отдельных метеостанциях с 10-ти минутным интервалом осреднения.

На рис. 8 приведена усредненная гистограмма и кривая распределения пульсаций ΔV и коэффициента порывистости K_n ветра по метео данным 11-ти морских портов.

Из анализа гистограммы следует, что закон распределения пульсаций ветра близок к нормальному с математическим ожиданием $m(\Delta V) = 4,3$ м/с и дисперсией $D(\Delta V) = 1,44$ м²/с². Вероятность пульсаций скорости ветра и вероятности коэффициентов порывистости ветра могут быть рассчитаны по формуле распределения Гаусса.

Повторяемость коэффициентов порывистости ветра, не превышающих $K_n = 1,4$, составляет около 99 %. Наиболее вероятное значение коэффициента порывистости составляет 1,25. Таким образом, полученные статистические характеристики порывистости ветра хорошо согласуются с результатами японских исследователей, приведенными на рис. 3, и отечественных – на рис. 4. Расхождение в распределениях наиболее вероятных значений коэффициентов порывистости ветра, приведенных на рис. 5 и 8, объясняется, прежде всего, учетом минимальных скоростей ветра (рис. 5), а также тем, что порывы ветра определялись для каждого интервала осреднения скорости ветра, в отличие от настоящего исследования (рис. 8), где максимальные порывы ветра выбирались один раз в течение часа.

В результате анализа теоретических работ, посвященных изучению порывистости ветра, а также настоящего исследования, динамическую составляющую скорости ветра в формуле (2) можно представить в виде канонического разложения случайной функции:

$$\Delta V(t) = \sum_{i=1}^n v_i \cdot \eta_i(t), \quad (3)$$

где v_i – коэффициенты разложения, случайные величины; η_i – координатные функции, например, тригонометрические. Тогда

$$V = \bar{V} + \sum_{i=1}^n v_i \cdot \sin \omega_i t, \quad (4)$$

где $\omega_i = 2\pi/\tau_i$ – круговые частоты порывов (пульсаций) ветра.

Выражая v_i через коэффициенты порывистости ветра, получим

$$V = \bar{V} \left[1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \cdot \sin \omega_i t \right]. \quad (5)$$

где K_{ni} и ω_i – случайные статистически зависимые величины.

2.4.3. Вероятностная оценка устойчивости направления ветра

Анализ экспериментальных кривых статистического распределения суммарного времени действия ветра показывает, что устойчивость направления ветра зависит, прежде всего, от ветрового района, в котором расположен порт, а также местных условий его расположения. На рис. 9 обозначены кривые: 1 – для портов Ленинград, Измаил (II ветровой район), Ильичевск, Таллин (III ветровой район), Вентспилс (IV ветровой район); 2 – для портов Амдерма, Ванино, Холмск, Корсаков (VI ветровой район); 3 – для порта PROVIDENIA (VII ветровой район); 4 – для порта Новороссийск (V ветровой район).

Ветер с продолжительностью действия 1-2 часа по одному и тому же направлению, как правило, не превышает скорости 15 м/с. При средних скоростях ветра от 15 до 20 м/с направление ветра достаточно устойчиво в течение 8-16 часов в портах, расположенных во II-IV ветровых районах, и свыше 16 часов в портах, расположенных в V-VII ветровых районах. Для порта Новороссийск, отличающегося особенностями местных условий, повторяемость ветра по одному и тому же направлению продолжительностью 8-24 часа составляет 70 %, а для портов, расположенных в VI-VII ветровых районах, – 50 %. Приведенные результаты свидетельствуют о достаточно устойчивом направлении ветра при скоростях ветра свыше 15 м/с, которое будет учитываться при расчетах порталных кранов на ветровую нагрузку, а также составлении и практическом использовании ветровых карт.

2.5. Ветровая нагрузка на порталный кран с грузом

Определим ветровую нагрузку на механизм изменения вылета стрелы и поворота крана в функции обобщенных координат ρ и φ точки движения подвеса груза. Схема действия ветровой нагрузки по координате ρ на стрелу в плоскости ее качания показана на рис. 1 (вид сбоку), где кроме величин, указанных ранее, обозначены:

ρ_i – текущая координата i -го элемента стрелы; h_i – высота i -го элемента стрелы; dh_i – элемент стрелы; h_0 – высота оси качания OO стрелы над поверхностью земли; r_0 – расстояние от оси вращения крана z до оси качания стрелы; o_1 – начало системы координат $x_1 o_1 y_1$, связанной со стрелой (выбирается произвольно по длине стрелы L , но рекомендуется – на ее середине); ось x_1 перпендикулярна оси симметрии стрелы и лежит в плоскости ее качания; O_2 – точка приложения полной ветровой нагрузки на стреловое устройство; R_1 – равнодействующая ветровой нагрузки в плоскости качания стрелы; заметим, что полная ветровая нагрузка на стреловое устройство разлагается на две ее составляющих: R_1 – в плоскости качания стрелы (вид сбоку) и R – в горизонтальной плоскости по координате φ (рис. 1 в плане); X_1 – составляющая ветровой нагрузки, перпендикулярная оси симметрии стрелы; Y_1 – составляющая ветровой нагрузки на стрелу, параллельная оси симметрии стрелы; C_{X1} , C_{Y1} , C_{R1} , C_{M1} – аэродинамические коэффициенты, соответственно, сил X_1 , Y_1 , R_1 и момента M_1 относительно точки o_1 , которые зависят от типа крана, вылета стрелы и угла его поворота (методика определения аэродинамических коэффициентов приведена в *Ерофеев и др.*, 1976; *Подобед*, 1982); l_1 – расстояние от оси качания стрелы OO до начала системы координат $x_1 o_1 y_1$; l_2 – расстояние от оси качания стрелы OO до точки O_2 приложения равнодействующей ветровой нагрузки R_1 ; l_{11} – смещение по оси стрелы точки приложения R_1 относительно $x_1 o_1 y_1$; l_{22} – смещение плеча приложения силы R_1 относительно начала системы координат $x_1 o_1 y_1$; l_{12} – плечо приложения составляющей силы R_1 относительно оси качания OO ; l_{21} – плечо приложения силы R_1 относительно оси качания стрелы OO ; ν – угол наклона стрелы от вертикали; θ – угол наклона равнодействующей R_1 к горизонтальной плоскости; ψ – угол между силами X_1 и R_1 ; P_{R1} – равнодействующая ветровой нагрузки, приведенная к точке подвеса груза "а"; P_{B1} – горизонтальная составляющая ветровой нагрузки на стрелу, приведенная к точке подвеса груза "а"; P_B – горизонтальная составляющая ветровой нагрузки на стрелу, приведенная к точке подвеса груза "а" с учетом аэродинамического влияния поворотной платформы (колонны) на стрелу; P_{h1} – вертикальная составляющая ветровой нагрузки на стрелу, приведенная к точке подвеса груза "а"; P_{Bh} – вертикальная составляющая ветровой нагрузки на стрелу, приведенная к точке подвеса груза "а", с учетом аэродинамического влияния поворотной платформы (колонны) на стрелу.

Ветровая нагрузка P_{B1} на стрелу равна

$$P_{B1} = P_{R1} \cdot \cos \theta, \quad (6)$$

равнодействующая

$$P_{R1} = R_1(l_2/L) = C_{R1}qF_\rho(l_2/L), \quad (7)$$

где $q = A \cdot V^2$ – величина давления ветра; $A = 1/16 = 0,0625$ – переводной коэффициент скорости ветра (м/с) в давление (кгс/м²); F_ρ – характерная наветренная площадь стрелы по координате ρ принимается согласно (ГОСТ 1451-77..., 1977).

Величина l_2 определяется из отношения:

$$l_{21}/l_2 = C_{X1}/C_{R1}. \quad (8)$$

Тогда

$$l_2 = l_{21}(C_{R1}/C_{X1}). \quad (9)$$

Плечо приложения силы R_1 равно

$$l_{21} = l_{12} + l_{22}.$$

Величина l_{12} определяется, аналогично (8):

$$l_{12} = l_1(C_{X1}/C_{R1}). \quad (10)$$

Смещение l_{22} силы R_1 определяется из равенства моментов, возникающих от действия ветровой нагрузки на стрелу относительно точки o_1 , выраженных соответственно через моментную C_{M1} и силовую C_{R1} характеристики

$$C_{M1}qF_\rho l_1 = C_{R1}qF_\rho l_{22}, \quad (11)$$

где l_1 является характерным плечом момента M_1 .

Из (11) определяем l_{22}

$$l_{22} = l_1(C_{M1}/C_{R1}). \quad (12)$$

Подставляя выражения для l_{12} и l_{22} в (10), а l_{21} – в (9), получим

$$l_2 = l_1(C_{X1} \pm C_{M1})/C_{X1}. \quad (13)$$

В (13) для коэффициента C_{M1} необходимо учитывать знак – положительное значение C_{M1} означает увеличение l_1 , т.е. смещение точки приложения ветровой нагрузки R_1 на стрелу в сторону точки подвеса груза, а отрицательное значение C_{M1} – наоборот. Подставляя выражение l_2 в (7), получим

$$P_{R1} = [C_{R1}(C_{X1} \pm C_{M1})/C_{X1}] \cdot (l_1/L) \cdot q \cdot F_\rho. \quad (14)$$

Значение аэродинамического коэффициента C_{R1} выражается через C_{x1} и C_{y1} :

$$C_{R1} = (C_{x1} + C_{y1})^{0.5}. \quad (15)$$

Выразим значение угла θ через известные углы ν и ψ :

$$\theta = \nu - \psi = \arcsin[(\rho - r_0)/L] - \arctg(C_{y1}/C_{x1}). \quad (16)$$

Подставляя выражения (14-16) в (6), получим:

$$P_{B1} = \left(\sqrt{C_{x1}^2 + C_{y1}^2} \cdot (C_{x1} \pm C_{M1}) / C_{x1} \right) \cdot (l_1/L) \cdot AV^2 F_\rho \cos \left(\arcsin \left(\frac{\rho - r_0}{L} \right) - \arctg \left(\frac{C_{y1}}{C_{x1}} \right) \right). \quad (17)$$

В формуле (17) P_{B1} определена для случая совпадения плоскости качания стрелы с направлением ветра (при $\varphi = 0^\circ; 180^\circ$). В случае, когда плоскость качания стрелы будет повернута на угол φ , что отвечает реальным условиям работы крана, составляющая скорости ветра будет равна $V \cos \varphi$, а P_{B1} равна

$$P_{B1} = \sqrt{C_{x1}^2 + C_{y1}^2} \cdot (C_{x1} \pm C_{M1}) / C_{x1} \cdot (l_1/L) \cdot AV^2 F_\rho \cos \left(\arcsin \left(\frac{\rho - r_0}{L} \right) - \arctg \left(\frac{C_{y1}}{C_{x1}} \right) \right) \cos \varphi. \quad (18)$$

Вертикальная составляющая P_{h1} ветровой нагрузки на стрелу, приведенная к точке подвеса груза "а" равна:

$$P_{h1} = \frac{\sqrt{C_{x1}^2 + C_{y1}^2} \cdot (C_{x1} \pm C_{M1})}{C_{x1}} \cdot \frac{l_1}{L} \cdot AV^2 F_\rho \sin \left(\arcsin \left(\frac{\rho - r_0}{L} \right) - \arctg \left(\frac{C_{y1}}{C_{x1}} \right) \right) \cdot \cos^2 \varphi. \quad (19)$$

С учетом аэродинамического влияния поворотной платформы или колонны на стрелу P_B равна:

$$P_B = AC_x \left((C_{x1} \pm C_{M1}) / C_{x1} \right) \cdot (l_1/L) \cdot V^2 F_\rho. \quad (20)$$

Вертикальная составляющая P_{Bh} для кранов с прямыми стрелами в этом случае равна

$$P_B = AC_x \left((C_{x1} \pm C_{M1}) / C_{x1} \right) \cdot V^2 F_\rho \cdot \operatorname{tg}(\arcsin((\rho - r_0) / L) - \operatorname{arctg}(C_{y1} / C_{x1})), \quad (21)$$

где C_x – аэродинамический коэффициент конструкции стрелового устройства по координате ρ определяется продувкой его модели в присутствии поворотной платформы или колонны.

Схема действия ветровой нагрузки на стрелу и поворотную часть крана по координате φ показана на рис. 1 (вид в плане), где кроме величин, указанных ранее, обозначены: xO_3y – система координат, связанная с поворотной частью крана, расположена в горизонтальной плоскости; ось x расположена в плоскости качания стрелы; X и Y – составляющие равнодействующей ветровой нагрузки R в горизонтальной плоскости; расположены в плоскости координат xO_3y ; X совпадает с осью x , а Y параллельна оси y ; $C_y, C_R, C_M, C_{M2}, C_{M3}$ – коэффициенты, соответственно, аэродинамических сил Y, R и моментов на всю поворотную часть крана в целом M , стрелу M_2 , поворотную платформу (колонну) M_3 ; l_3 – расстояние по горизонтали от оси вращения крана z до точки приложения R ; l_{31} – плечо действия силы R , лежит в горизонтальной плоскости.

Рассматривая случай вращения крана против ветра, момент M_B от ветровой нагрузки, воздействующий на механизм поворота относительно оси вращения крана z , равен:

$$M_B = M_2 - M_3, \quad (22)$$

где M_2 – момент от сил ветра на стрелу относительно оси вращения крана z ; M_3 – момент от сил ветра на поворотную платформу (колонну) относительно оси вращения крана z .

M_2 выражается через моментную характеристику C_{M2} :

$$M_2 = AC_{M2} V^2 F_\varphi \rho, \quad (23)$$

где F_φ – характерная наветренная площадь стрелы по координате φ принимается согласно (ГОСТ 1451-77, 1978).

Аналогично (23), M_3 равен

$$M_3 = AC_{M3} V^2 F_\varphi \rho. \quad (24)$$

Тогда M_B равен

$$M_B = (C_{M2} - C_{M3}) V^2 F_\varphi \rho = AC_M V^2 F_\varphi \rho. \quad (25)$$

В формулах (23-25) ρ является характерным плечом для моментов M, M_2, M_3 .

Величина l_3 определяется из отношения:

$$l_{31} / l_3 = C_y / C_R, \quad (26)$$

откуда

$$l_3 = l_{31} (C_R / C_y); \quad (27)$$

l_{31} – из равенства моментов

$$M_2 = M_{21}. \quad (28)$$

Момент M_{21} от сил ветра на стрелу относительно z , выраженный через силовую характеристику C_R , равен:

$$M_{21} = C_R A V^2 F_\varphi l_{31}. \quad (29)$$

Подставляя M_2 из (23) и M_{21} из (29) в равенство (28), получим:

$$l_{31} = C_{M2} \rho / C_R. \quad (30)$$

Тогда

$$l_3 = C_{M2} \rho / C_y. \quad (31)$$

Для случаев совпадения точек приложения сил ветра на стрелу по координатам ρ и φ величину l_3 можно выразить как проекцию l_2 на горизонтальную плоскость. Тогда на основании формулы (13) получим

$$l_3 = [l_1 (C_{x1} \pm C_{M1}) / C_{x1}] \cdot [(\rho - r_0) / L]. \quad (32)$$

Запишем выражения ветровой нагрузки для расчетов стрелового устройства, а также механизмов вылета и поворота крана в функции координат ρ и φ .

Расчетная ветровая нагрузка на стрелу по координате ρ , приведенная к точке подвеса груза "а"

$$P_B = AC_x K V^2 F_\rho, \quad (33)$$

где

$$K = [(C_{x1} \pm C_{M1}) / C_{x1}] (l / L)$$

– коэффициент приведения ветровой нагрузки на стрелу к точке подвеса груза; для кранов с шарнирно-сочлененной укосиной $K \approx 0,5$, а для кранов с прямой стрелой $K \approx 0,4$.

Расчетная вертикальная составляющая ветровой нагрузки на стрелу, приведенная к точке подвеса груза "а"

$$P_{Bh} = AC_x K V^2 F_\rho \operatorname{tg}[\arcsin((\rho - r_0) / L) - \operatorname{arctg}(C_{y1} / C_{x1})]. \quad (34)$$

Момент от ветровой нагрузки на стрелу относительно оси вращения крана z

$$M_2 = AC_{M2}V^2F_{\phi}\rho. \quad (35)$$

Момент от ветровой нагрузки на поворотную часть крана относительно оси вращения крана z

$$M = AC_MV^2F_{\phi}\rho. \quad (36)$$

2.6. Ветровая нагрузка на кран с грузом с учетом влияния скоростей движений крановых механизмов

Определим ветровую нагрузку на кран с грузом с учетом собственной скорости движения стрелы в функции координат точки подвеса груза. Суммарная скорость воздушного потока на стрелу равна

$$V_C = V_i + V, \quad (37)$$

где V_i – вектор скорости i -ой точки перемещающейся стрелы; V – вектор скорости ветра, параллельный поверхности земли и приложенный в той же i -ой точке.

Определим ветровую нагрузку на стреловое устройство по координате ρ (рис. 1). Проекция вектора скорости нока стрелы (точки "a") на направление вектора скорости ветра равна $\dot{\rho}\cos\varphi$. Проекция вектора скорости i -ой точки стрелы на направление вектора скорости ветра равна

$$V_{i\rho} = \dot{\rho} \cos(\varphi((h_i - h_0)/(h - h_0))). \quad (38)$$

По формуле (33) суммарная ветровая нагрузка на стрелу, приведенная к точке подвеса груза "a"

$$P_B = \int_{h_0}^h AC_x K (V_{i\rho} + V)^2 b dh_i, \quad (39)$$

где b – ширина характерной наветренной площади стрелы; $dF_{\rho} = b dh_i$ – элементарная наветренная площадка стрелы.

Подставляя в формулу (5) степенную функцию зависимости средней скорости ветра \bar{V} от высоты крана, получим:

$$V = \bar{V}_{10} a^{1/2} h_i^{\alpha/2} [1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \sin \omega_i t], \quad (40)$$

где \bar{V}_{10} – средняя скорость ветра на высоте 10 м от поверхности земли; a и α – постоянные коэффициенты, зависящие от ветрового района установки крана, их средние значения, соответственно, равны: $a = 0,49$ и $\alpha = 0,33$.

Подставляя выражения $V_{i\rho}$ и V в (39), а затем, интегрируя, получим

$$\begin{aligned} P_B &= \int_{h_0}^h AC_x K \left(\dot{\rho} \cos \varphi \frac{h_i - h_0}{h - h_0} + \bar{V}_{10} \cdot a^{1/2} h_i^{\alpha/2} \left[1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \cdot \sin \omega_i t \right] \right)^2 b dh_i = \\ &= AC_x K b \left(\rho^2 \cos^2 \varphi \frac{h_i - h_0}{3} + \frac{2\rho \cos \varphi \bar{V}_{10} a^{1/2}}{h - h_0} \left(h^{\frac{4+\alpha}{2}} - h_0^{\frac{4+\alpha}{2}} - h_0 \cdot \frac{h^{\frac{2+\alpha}{2}} - h_0^{\frac{2+\alpha}{2}}}{\frac{2+\alpha}{2}} \right) \times \right. \\ &\quad \left. \times \left(1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \sin \omega_i t \right) + \bar{V}_{10}^2 \cdot a \cdot \frac{h^{1+\alpha} - h_0^{1+\alpha}}{1 + \alpha} \left(1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \cdot \sin \omega_i t \right)^2 \right) \end{aligned} \quad (41)$$

По аналогии, вертикальная составляющая ветровой нагрузки на стрелу, приведенная к точке подвеса груза "a" (по формуле 34), равна

$$\begin{aligned} P_{Bh} &= AC_x K b \left(\rho^2 \cos^2 \varphi \frac{h - h_0}{3} + \frac{2\rho \cos \varphi \cdot \bar{V}_{10} \cdot a^{1/2}}{h - h_0} \left(h^{\frac{4+\alpha}{2}} - h_0^{\frac{4+\alpha}{2}} - h_0 \cdot \frac{h^{\frac{2+\alpha}{2}} - h_0^{\frac{2+\alpha}{2}}}{\frac{2+\alpha}{2}} \right) \times \right. \\ &\quad \left. \times \left(1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \cdot \sin \omega_i t \right) + \bar{V}_{10}^2 \cdot a \cdot \frac{h^{1+\alpha} - h_0^{1+\alpha}}{1 + \alpha} \left(1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \cdot \sin \omega_i t \right)^2 \right) \cdot \operatorname{tg} \left(\arcsin \frac{\rho - r_0}{L} - \operatorname{arctg} \frac{C_{y1}}{C_{x1}} \right) \end{aligned} \quad (42)$$

Найдем ветровую нагрузку на стрелу по координате φ с учетом скорости вращения крана. Проекция вектора линейной скорости вращения нока стрелы на направление вектора скорости ветра равна $\rho\dot{\varphi} \sin \varphi$. Проекция вектора скорости i -ой точки стрелы на направление вектора скорости ветра равна

$$V_{i\varphi} = \rho\dot{\varphi} \sin \varphi ((h_i - h_0)/(h - h_0)). \quad (43)$$

Плечо приложения элементарной силы ветра на стрелу

$$\rho_i = r_0 + (h_i - h_0)/\text{ctg} \nu. \quad (44)$$

Подставляя выражения скоростей V и $V_{i\varphi}$ в формулу (35), а затем, интегрируя, получим

$$\begin{aligned} M_2 &= \int_{h_0}^h AC_{M_2} b_1 \left[\rho \varphi \sin \varphi \frac{h_i - h_0}{h - h_0} + \bar{V}_{10} a^{\frac{1}{2}} h^{\frac{\alpha}{2}} \left[1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \sin \omega_i t \right]^2 \right] \times \left(r_0 + \frac{h_i - h_0}{\text{ctg} \nu} \right) dh_i = \\ &= AC_{M_2} b_1 \left\{ \left[\rho^2 \varphi^2 \sin^2 \varphi \frac{h - h_0}{3} + \bar{V}_{10} \cdot a^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{2\rho \varphi \sin \varphi}{h - h_0} \cdot \left(h^{\frac{4+\alpha}{2}} - h_0^{\frac{4+\alpha}{2}} - h_0 \cdot \frac{h^{\frac{2+\alpha}{2}} - h_0^{\frac{2+\alpha}{2}}}{\frac{2+\alpha}{2}} \right) \right] \times \right. \\ &\times \left(1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \cdot \sin \omega_i t \right) + \bar{V}_{10}^2 \cdot a \cdot \frac{h^{1+\alpha} - h_0^{1+\alpha}}{1 + \alpha} \left(1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \sin \omega_i t \right)^2 \left. \right] \cdot r_0 + \frac{\rho^2 \varphi^2 \sin^2 \varphi \cdot (h - h_0)^2}{4 \text{ctg} \nu} + \\ &+ \frac{2\rho \varphi \sin \varphi}{(h - h_0) \text{ctg} \nu} \cdot \bar{V}_{10} \cdot a^{\frac{1}{2}} \left[\frac{h^{\frac{6+\alpha}{2}} - h_0^{\frac{6+\alpha}{2}}}{\frac{6+\alpha}{2}} - 2h_0 \cdot \frac{h^{\frac{4+\alpha}{2}} - h_0^{\frac{4+\alpha}{2}}}{\frac{4+\alpha}{2}} + h_0^2 \cdot \frac{h^{\frac{2+\alpha}{2}} - h_0^{\frac{2+\alpha}{2}}}{\frac{2+\alpha}{2}} \right] \times \\ &\times \left(1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \cdot \sin \omega_i t \right) \left. \right] + \frac{\bar{V}_{10}^2 \cdot a}{\text{ctg} \nu} \left[\frac{h^{2+\alpha} - h_0^{2+\alpha}}{2 + \alpha} - h_0 \frac{h^{1+\alpha} - h_0^{1+\alpha}}{1 + \alpha} \right] \cdot \left(1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \cdot \sin \omega_i t \right)^2 \left. \right\}, \end{aligned} \quad (45)$$

где b_1 – ширина наветренной поверхности конструкции стрелы.

Ветровая нагрузка в плоскости качания стрелы на груз с учетом его перемещения по координате ρ_α равна

$$P_{\rho_\alpha} = AC_2 F_2 \left(\dot{\rho}^2 + 2\dot{\rho}\bar{V} \left[1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \cdot \sin \omega_i t \right] \cos \varphi + \bar{V}^2 \left[1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \cdot \sin \omega_i t \right] \cos^2 \varphi \right), \quad (46)$$

где C_2 – коэффициент аэродинамического сопротивления груза принимается максимальным по величине, так как груз стремится развернуться наибольшей наветренной поверхностью в направлении, перпендикулярном движению воздушного потока; F_2 – характерная наветренная площадь груза.

Момент относительно оси вращения крана z от действия ветровой нагрузки на груз с учетом его перемещения по координате φ_α равен

$$M_{\rho_\alpha} = AC_2 F_2 \rho \left(\dot{\varphi}^2 \rho^2 + 2\dot{\varphi}\rho\bar{V} \cdot \left(1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \cdot \sin \omega_i t \right) \sin \varphi + \bar{V}^2 \cdot \left(1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \cdot \sin \omega_i t \right)^2 \sin^2 \varphi \right). \quad (47)$$

В формулах ветровой нагрузки, действующей на груз, принято $\dot{\rho}_\alpha \approx \dot{\rho}$; $\dot{\varphi}_\alpha \approx \dot{\varphi}$.

2.7. Расчетные зависимости ветровой нагрузки

В соответствии с ГОСТ 1451-77 при расчетах статической составляющей ветровой нагрузки, соответствующей средней скорости ветра, исходным является скоростной напор ветра на высоте 10 м над поверхностью земли. По нему определяют скоростной напор ветра на других высотах путем умножения на соответствующие поправочные коэффициенты возрастания в зависимости от высоты крана над поверхностью земли. Исследование различных способов задания скоростного напора ветра по высоте крана (постоянный, ступенчатый, степенной) и формы наветренной площади показало, что в расчетах скоростной напор ветра (давление) можно принимать постоянным в пределах высоты отдельных частей крана (портал, стрела, поворотная часть крана и т.п.). При этом должна приниматься величина давления, соответствующая высоте, соответствующей половине высоты исследуемой конструкции. Это является упрощением, однако, как показали проверочные расчеты по формулам, приведенным в (Ерофеев и др., 1977), такое допущение не вносит существенной погрешности и значительно упрощает расчетные формулы ветровой нагрузки на кран с грузом.

Таким образом, на постоянную составляющую скорости ветра в пределах отдельных частей крана накладываются случайные пульсации скорости ветра, которые носят стационарный характер. Такое представление ветровой нагрузки отвечает реальному ее воздействию с определенным запасом по сравнению с представлением ее случайным полем давлений с учетом пространственно-временной корреляции. Переход от скоростей ветра к аэродинамическим силам, как установлено в работах (Davenport, 1961; 1967; 1973; Davenport, Vickery, 1967; Барштейн, 1959; 1974), осуществляется с помощью аэродинамической передаточной функции, равной единице, с использованием аэродинамических характеристик порталных кранов, полученных в стационарном воздушном потоке.

Учитывая вышеизложенные допущения и рассуждения, а также опуская члены первого и более порядка малости в формулах (41, 42, 45, 46, 47) ветровой нагрузки на кран с грузом, окончательно получим:

– приведенное к точке подвеса груза усилие от сил ветра на стрелу по координате ρ

$$P_B = AC_x K F_\rho \bar{V}^2 \left[1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \sin \omega_i t \right]^2; \quad (48)$$

– вертикальная составляющая ветровой нагрузки на стрелу, приведенная к точке подвеса груза

$$P_{Bh} = AC_x K F_\rho \bar{V}^2 \left(1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \sin \omega_i t \right)^2 \times \operatorname{tg} \left(\arcsin \frac{\rho - r_0}{L} - \operatorname{arctg} \frac{C_{y1}}{C_x} \right); \quad (49)$$

– приведенный к оси вращения крана момент от сил ветра, действующий на поворотную часть крана по координате φ

$$M_B = AC_M F_\rho \rho \left[\varphi \rho V \left(1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni-1}) \sin \omega_i t \right) \sin \varphi + V^2 \left(1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni-1}) \sin \omega_i t \right)^2 \right]; \quad (50)$$

– усилие от сил ветра на груз относительно оси вращения крана по координате ρ_α

$$P_{\rho\alpha} = AC_z F_z \bar{V}^2 \left[1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \sin \omega_i t \right]^2 \cos^2 \varphi; \quad (51)$$

– момент от сил ветра на груз относительно оси вращения крана по координате φ_α

$$M_{\varphi\alpha} = AC_z F_z \rho \left[2\varphi \rho V \left(1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni} - 1) \sin \omega_i t \right) \sin \varphi + V^2 \left(1 + \sum_{i=1}^n (K_{ni-1}) \sin \omega_i t \right)^2 \sin^2 \varphi \right]. \quad (52)$$

Ветровая нагрузка на кран с грузом без учета динамической составляющей определяется в предположении, что $K_n = 1,0$.

3. Выводы

Составлена расчетная схема нагрузок на порталные краны с грузом с прямой стрелой и шарнирно-сочлененной укосиной. Расчетная схема крана с грузом, как материальная система с пятью степенями свободы, представлена в цилиндрической системе координат, которые непосредственно характеризуют параметры рабочего процесса крана. Две координаты – φ и ρ – определяют текущее положение точки подвеса груза, а три других – φ_α , ρ_α , z_α – положение центра тяжести груза при голономной, нестационарной, идеальной связи. При этом принятые допущения в расчетной схеме отвечают основной поставленной цели.

Установлены основные параметры ветрового воздействия на портовые краны, к которым относятся: средняя скорость ветра, осредненная за определенный интервал времени, максимальная скорость ветра с повторяемостью за определенный промежуток времени, порывистость ветра, характеризующаяся коэффициентами и продолжительностью порывов (периодами), направление ветра, как векторная величина.

Анализ средних скоростей ветра по семи ветровым районам России свидетельствует, что продолжительность действия средних скоростей ветра, превышающих 20 м/с, в среднем составляет 0,4 %. В связи с этим исследования работы портовых кранов проводились при средних скоростях ветра от 15 до 20 м/с.

Максимальные скорости ветра с периодом разового действия сильного ветра за год или несколько лет в районах установки кранов используются в расчетах собственной устойчивости кранов. Максимальные скорости устойчивого порывистого ветра с более частой повторяемостью один раз в 2 мин, 10 мин учитывались при исследованиях основных показателей работоспособности порталных кранов.

Динамическая составляющая ветровой нагрузки, обусловленная порывистостью ветра, определяется коэффициентами порывистости, равными отношению максимальных скоростей ветра к средней скорости ветра, и продолжительностью порывов (пульсаций) ветра.

В результате анализа работ, выполненных советскими и японскими учеными по исследованию параметров ветра в диапазоне средних скоростей от 15 до 20 м/с, получены следующие результаты:

– интервал осреднения максимальной скорости ветра в порывах в пределах от 2 до 10 с мало влияет на коэффициент порывистости K_n , в связи с чем принимается 5-секундный интервал осреднения;

- при средней скорости ветра свыше 15 м/с значение коэффициента K_n практически не превышает 1,4 и стабилизируется вокруг среднего значения, равного 1,23;
- коэффициенты порывистости ветра K_n практически не зависят от высоты крана и интервалов осреднения средней скорости ветра в пределах от 10 с до 10 минут, в связи с чем $K_n = 1,23$ может быть принят постоянным по высоте крана при средних скоростях ветра от 15 до 20 м/с;
- получены количественные статистические характеристики коэффициентов порывистости ветра; повторяемость $K_n = 1,05-1,10$ составляет около 40 %, а повторяемость $K_n < 1,5$ составляет около 99,8 %;
- установлена статистическая зависимость между средними скоростями ветра, коэффициентами порывистости и продолжительностью порывов; в диапазоне средних скоростей от 15 до 20 м/с порывы могут быть разделены на две группы: первая группа – весьма кратковременные с продолжительностью 5-6 с коэффициентами порывистости $K_n = 1,05-1,10$ и вторая группа – довольно длительные с продолжительностью 30-40 с с $K_n = 1,3-1,4$.

В результате статистической обработки записей скорости ветра, выполненных автором, на метеостанции Ильичевск-порт и статистической обработки 666 зарегистрированных случаев действия средних скоростей ветра от 15 до 20 м/с с порывами в 11-и морских портах, расположенных в различных ветровых районах России:

- установлен характер изменения динамической составляющей скорости ветра в функции времени, который можно представить тригонометрическими функциями – синусоидами со случайными амплитудами пульсаций, определяемыми коэффициентами порывистости и периодами их пульсаций;
- получен закон распределения максимальных пульсаций ветра, который близок к нормальному. Наиболее вероятное значение коэффициента порывистости составляет 1,25, а пределы его изменения – $1,05 \leq K_n \leq 1,45$; повторяемость $K_n < 1,4$ составляет около 99 %;
- установлена статистическая зависимость между продолжительностью пульсаций и коэффициентами порывистости ветра;
- построены экспериментальные кривые статистического распределения продолжительности действия ветра по направлениям; устойчивость направления ветра, выраженная в часах, зависит от ветрового района и местных условий расположения морского порта и величины средней скорости ветра; при исследуемых скоростях ветра его направление достаточно устойчиво в течение 8-16 часов в портах, расположенных во II – IV ветровых районах, и свыше 16 часов в портах, расположенных в V – VII ветровых районах;
- полученные статистические характеристики порывистости ветра хорошо согласуются с результатами исследований отечественных и японских ученых.

Ветровая нагрузка представлена в виде суммы двух ее составляющих: статической – соответствующей средней скорости ветра, осредненной за 2-х минутный интервал времени, и динамической – соответствующей пульсационной составляющей, представляемой тригонометрическими функциями – синусоидами со случайными амплитудами (коэффициентами порывистости) и периодами их пульсаций.

Получены расчетные формулы ветровой нагрузки на кран с грузом с учетом динамической ее составляющей, изменения скоростного напора ветра по высоте крана и собственных скоростей движения механизмов в функции обобщенных координат – угла поворота φ и вылета стрелы крана ρ (53-57).

Составляющая ветровой нагрузки, вызванная скоростью вращения поворотной части крана, увеличивает на 30-40 % нагрузку от сил ветра и поэтому должна учитываться в расчетах механизмов вращения кранов, поставляемых в V – VII ветровые районы.

Литература

- Davenport A.G.** The application of statistical concepts to the wind loading of structures. *Proc. Inst. of Civ. Engineers*, v.19, p.449-472, 1961.
- Davenport A.G.** Gust loading factors. *Inst. of Structural Division. Proc. A.S.C.E.*, v.93, N 3, p.11-34, 1967.
- Davenport A.G., Vickery B.I.** A comparison of theoretical and experimental determination of the response of elastic structures. *Symposium of Wind on Structures. Ottawa*, p.37-65, 1967.
- Davenport A.G.** Approaches to wind loading on structures. *Aero-hydro-elast. Cycle Conf., Ermenonville, 1972. Paris*, p.51-132, 1973.
- Барштейн М.Ф.** Воздействие ветра на высокие сооружения. *Строительная механика и расчет сооружений*, № 1, с.19-32, 1959.
- Барштейн М.Ф.** Ветровая нагрузка на здания и сооружения. *Строительная механика и расчет сооружений*, № 4, с.43-48, 1974.
- ГОСТ 1451-77. Краны грузоподъемные. Нагрузка ветровая. М., Госстандартиздат, 19 с., 1978.

- Ерофеев Н.И.** Математическая модель режима работы крановых установок. *Автоматика и телемеханика*, № 3, с.160-166, 1967.
- Ерофеев Н.И., Лисовой П.Я., Подобед В.А.** Экспериментальное определение аэродинамических характеристик модели порталного крана. *Известия вузов. Машиностроение*, № 5, с.127-131, 1976.
- Ерофеев Н.И., Подобед В.А., Лисовой П.Я.** Определение допустимых рабочих скоростей ветра грузоподъемных кранов. *Судостроение и судоремонт. Сб. научных трудов ОИИМФа. М., ЦРИА "Морфлот"*, вып. IX, с.101-107, 1977.
- Зубко Н.Ф., Подобед В.А.** Нормирование ветровых нагрузок для рабочего состояния грузоподъемных кранов. *Безопасность труда в промышленности*, № 5, с.54-55, 1982.
- Луговский В.В.** Динамика моря. *Л., Судостроение*, 200 с., 1976.
- Подобед В.А.** Исследование работоспособности порталных кранов при воздействии ветра. *Автореферат канд. диссертации. ЛИИВТ*, 1982.
- Подобед В.А., Подобед Н.Е.** Математическое моделирование ветровых и сейсмических нагрузок на порталные краны в рабочем состоянии. *Мурманск, Тезисы докладов юбилейной научной конференции МВИМУ*, с.77-81, 1990.
- Подобед В.А., Подобед Н.Е.** Вероятностная оценка устойчивости направления и порывистости ветра. *Материалы международной научно-технической конференции "Наука и образование – 2004"*, Мурманск, МГТУ, с.241-245, 2004.
- Труды конференции по аэродинамике и аэроупругости высоких строительных сооружений. *Москва, издательский отдел ЦАГИ*, 208 с., 1976.