УДК 69.002.5
DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-584-597

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ В ПРИБОРАХ БЕЗОПАСНОСТИ КРАНОВ НА ПРИМЕРЕ КРАНОВОГО АНЕМОМЕТРА

В.А. Рощин[1], С.Д. Иванов[2], А.Н. Назаров[2]
[1]ЗАО «Инженерно-технический центр «КРОС», г. Ивантеевка, Россия
[2]МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. *В настоящей статье описывается разработанный авторами алгоритм работы кранового анемометра, измеряющего скорость порывов и среднюю скорость ветра и определяющего на их основе прогнозируемую скорость ветра.*
Основная часть. *Для построения алгоритма работы анемометра определены основные влияющие параметры и интервалы их измерения. Представлена методика вычисления скорости порывов и средней скорости ветра из показаний импульсного датчика вертушки анемометра. Приведён метод прогнозирования скорости ветра на основе построения экстраполяционной функции.*
Результаты. *Разработан алгоритм программы работы анемометра с расширенными возможностями по отношению к существующим аналогам. Прибор не только фиксирует значение опасного фактора в данный момент, но и прогнозирует его изменение в будущем.*
На основе анализа исследований динамики ветра составлена таблица соответствия уровней определяемых параметров (скорости порыва, средней скорости и прогнозируемой средней скорости ветра) и сигналов, подаваемых оператору крана. Для каждого типа сигналов определено своё значение величины задержки снятия.
Выводы и заключение. *Предприятием ЗАО ИТЦ «КРОС» изготовлен опытный образец анемометра, использующего описанные в данной статье принципы. Прибор соответствует всем требованиям нормативно-технической документации. Дальнейшая работа по совершенствованию алгоритма его работы позволит повысить безопасность технологических процессов, осуществляемых с использованием подъёмных сооружений.*

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *крановый анемометр, прогнозирование скорости ветра, алгоритм работы анемометра.*

БЛАГОДАРНОСТИ. *Авторы статьи выражают свою благодарность сотрудникам кафедры «Подъёмно-транспортные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана и коллективу разработчиков приборов безопасности ЗАО «ИТЦ «КРОС» за их помощь, советы, рекомендации, ценные замечания и критику.*

Поступила 12.10.20, принята к публикации 23.10.20.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Рощин В.А., Иванов С.Д., Назаров А.Н. Применение методов прогнозирования опасных факторов в приборах безопасности кранов на примере кранового анемометра. *Вестник СибАДИ.* 2020; 17 (5): https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-584-597

© Рощин В.А., Иванов С.Д., Назаров А.Н.

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-584-597

HAZARD FORECASTING TECHNIQUES IMPLEMENTATION IN CRANE SAFETY INSTRUMENTS USING A CRANE ANEMOMETER

V.A. Roshchin[1], S.D. Ivanov[2], A.N. Nazarov[2]
[1]ZAO KROS Engineering and Technical Centre, Ivanteevka, Russia,
[2]N.E. Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

ABSTRACT

Introduction. *This article describes an algorithm developed by the authors for the operation of a crane anemometer that measures the gust rate and average wind speed and determines the predicted wind speed on the basis of it.*
The main part. *The main influencing parameters and their measurement intervals are defined for the construction of the anemometer algorithm. The method of calculation of gust velocity and average wind velocity from the data of the pulse sensor of the helicopter anemometer is presented. The method of wind speed forecasting based on the construction of an extrapolation function is given.*
Results. *An anemometer program algorithm with extended capabilities relative to existing analogues has been developed. The instrument not only captures the hazard at the moment, but also predicts its future development. On the basis of the analysis of wind dynamics studies, a table has been compiled of the levels of the determined parameters (gust rate, average speed and projected average wind speed) and the signals given to the operator of the crane. For each type of signal, the value of the removal delay is defined.*
Conclusions. *ZAO KROS Engineering and Technical Centre has made a prototype anemometer using the principles described in this article. The device meets all requirements of the regulatory and technical documentation. Further work on the improvement of the algorithm of its work will make it possible to increase the safety of technological processes carried out with the use of elevated structures.*

KEYWORDS: *crane anemometer, wind speed forecasting, anemometer algorithm.*

ACKNOWLEDGEMENTS. *The authors of the article express their gratitude to the staff of the Elevated-transportation systems Department, N.E. Bauman MGTU and the team of the developers of the security devices of ZAO KROS Engineering and Technical Centre for their help, advice, recommendations, valuable comments and criticism.*

Submitted 12.10.20, revised 23.10.2020.
The authors have read and approved the final manuscript.
Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation: V.A. Roshchin, S.D. Ivanov, A.N. Nazarov. Hazard forecasting techniques implementation in crane safety instruments using a crane anemometer. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2020; 17 (5): https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-584-597

© Roshchin V.A., Ivanov S.D., Nazarov A.N.

Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Уровень развития микропроцессорной техники сегодня позволяет разрабатывать приборы, которые будут не только реагировать на опасные факторы, но и прогнозировать их развитие и до достижения предельных значений информировать машиниста крана. Данный подход к разработке приборов безопасности рассмотрим на примере кранового анемометра.

Скорость ветра является допустимой паспортной характеристикой крана. Сегодня анемометры определяют текущее значение скорости ветра и сравнивают его с допустимым (паспортным), но на момент определения характеристика уже достигнута. Поэтому было решено расширить функционал прибора прогнозированием скорости ветра хотя бы на время нескольких технологических операций, чтобы крановщик мог принять решение о начале рабочего цикла.

На данный момент на российском рынке монопольную позицию занимают анемометры семейства АСЦ-3[1]. Принцип их действия заключается в непрерывном измерении частоты вращения вертушки, пропорциональной скорости ветра, и в случае превышения определённого порога в течение определённого времени срабатывает сигнализация и исполнительное реле. В последних моделях добавлена возможность определения средней скорости ветра за устанавливаемый промежуток времени. Как видно из описания работы АСЦ-3, информация о параметрах ветра не проходит дополнительной обработки, с помощью которой можно было бы судить об изменении параметров ветра в будущем, то есть анемометр фиксирует наступившее превышение ветровой нагрузки, которое уже воздействует на кран [1, 2, 3, 4, 5, 6].

В статьях [7, 8, 9] описан способ прогнозирования параметров ветрового потока. Его сущность заключается в обеспечении устойчивости башенных кранов от опрокидывания при пульсирующем воздействии ветровой нагрузки на основе нейросетевой системы управления путем прогнозирования будущего значения скорости ветра. Оно сравнивается с предельно допустимым значением, и выдаётся команда управления на исполнительные органы для корректировки положения стрелы с целью уменьшения давления на металлоконструкцию башенного крана, обусловленного пульсациями ветровой нагрузки, до того, как опрокидывающий момент от ветровой нагрузки достигнет критического значения. В приводе поворота применена активная система управления, целью которой является обеспечение принудительного поворота стрелы в зависимости от показаний датчиков [10, 11, 12]. Для обучения нейронной сети используются метеорологические данные (максимальная, средняя скорость ветра и его направление) района установки крана. В процессе эксплуатации крана сеть дообучается в конкретных условиях работы.

Недостаток данного метода заключается в необходимости иметь достаточно большие базы данных параметров ветрового потока для различных районов установки крана. Следовательно, прибор, использующий данный метод, или не будет обладать универсальностью (нейросети всех систем будут изначально обучены одинаково), так как в нашей стране присутствуют все ветровые зоны, или будет требовать дополнительной наладки (обучение нейросетей на наборе данных конкретного района установки крана), проводимой высококвалифицированным персоналом, и после этой настройки прибор будет некорректно работать при перемещении крана в другой ветровой район. Кроме того, идея автоматического управления приводами крана на основе показаний анемометра не является общепринятой.

Ещё одним методом получения информации об изменении скорости ветра является применение математической модели на основе цепей Маркова с дискретным временем [13, 14, 15]. Она описывает систему, которая изменяет свои состояния в дискретные моменты времени, согласуясь с некоторым случайным механизмом. Математическая модель изменения скорости ветра содержит вероятности перехода к другим скоростям, то есть вероятность снижения или усиления ветра, а если рассматривать фиксированное время, то ещё и его ускорение.

Цепи Маркова работают с дискретным количеством состояний системы, что требует разделения диапазона возможных скоростей ветра на интервалы. Интервалы разбиения по скорости имеют длину 1–2 м/с, по времени 1–10 сек.

[1] Анемометр сигнальный цифровой АСЦ-3 ТКрЭ 202108.000 ПС Паспорт. URL: https://ekspertcentre.ru/assets/files/%D0%90%D0%A1%D0%A6-3.pdf (дата обращения: 02.10.2020).

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Цепь Маркова высшего порядка позволяет установить соответствие между рядом последовательных состояний системы в прошлом и вероятностями перехода в определённые состояния в будущем. Следует отметить, что для построения цепей Маркова необходимо воспользоваться достаточным объёмом экспериментальных данных для определения вероятности перехода в цепях событий, а с увеличением длины цепи (то есть при большем периоде прогнозирования) объём требуемых экспериментальных данных быстро нарастает.

Таким образом, не было выявлено единого подхода к решению задачи прогнозирования динамики ветрового потока. Каждый из методов обладает преимуществами и недостатками. Потенциально, так как алгоритмы базируются на метеорологических данных, они должны обладать высокой вероятностью правильных прогнозов, но поэтому же теряют гибкость в различных условиях и требуют сложных технических средств реализации: большей по объёму памяти для хранения предобученной нейросети или цепи Маркова, более мощных микропроцессорных блоков для дообучения и реализации сложных алгоритмов. Кроме того, следует отметить, что все приведённые алгоритмы существуют в рамках теорий и не проходили проверки в реальных условиях.

Цель данной работы – создание алгоритма управления анемометром, который не требует сложной настройки прибора, но при этом будет обеспечивать безопасность технологических процессов с применением подъёмных сооружений, отвечать современному техническому уровню и соответствовать требованиям нормативно-технической документации [2,3,4,5].

Для выполнения цели требуется решить следующие задачи:

- определить начальные параметры, необходимые для прогнозирования ветрового потока;
- разработать методику, согласно которой из начальных параметров получают информацию о необходимости прекращения работы;
- определить информацию, которой нужно снабжать оператора крана и которую необходимо записывать в регистратор параметров.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Необходимо установить, какие параметры необходимо получать, и ограничить диапазон их измерения. Первый из них – максимальное значение скорости ветра, определяемой анемометром.

Согласно карте ветровых районов[5], максимальная скорость ветра, превышаемая не чаще, чем раз в 5 лет, может достигать 40 м/с. Но это значение не является скоростью ветра рабочего состояния и контролироваться анемометром не должно. По карте ветровых районов было определено, что только два субъекта РФ принадлежат к группе больше V. Это Краснодарский (VI) и Камчатский край (VII).

Замечено, что краны одной и той же серии могут устанавливаться в разных ветровых районах, где соответственно действуют различные ветровые нагрузки. Был проведён анализа линейки кранов КБ (КБ 100 – КБ 674). Эти краны допускается использовать в ветровых районах с I по VII. В зависимости от района допустимая скорость рабочего состояния остаётся постоянной (20 м/с), но, чтобы компенсировать различия в ветровой нагрузке, изменяется исполнение крана, применяемое в конкретных условиях (ограничивается максимальная высота подъёма). Отметим, что в паспортах этих кранов скорость ветра определяется как осреднение за 2 мин.

В статьях [16, 17, 18] приведена информация, что время действия средних скоростей ветра, превышающих 20 м/с, в среднем по всем ветровым районам составляет около 0,4 %.

В соответствии с (табл. 5)[5] для кранов, установленных на объектах, исключающих перерывы в работе, максимальная допустимая скорость ветра составляет 28,5 м/с, поэтому

[2] Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. Приказ от 12 ноября 2013 года N 533 об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_157709/ (дата обращения: 08.08.2020).

[3] ГОСТ 32575-2013 Межгосударственный стандарт. Краны грузоподъемные. Ограничители и указатели. URL: http://docs.cntd.ru/document/1200112635. (дата обращения 07.05.2020).

[4] РД 24.090.102-01 Основные требования безопасности к устройству и эксплуатации ветрозащитных систем мостовых и козловых кранов. URL: http://docs.cntd.ru/document/1200031551. (дата обращения: 16.07.2020).

[5] ГОСТ 1451-77 Краны грузоподъемные. Нагрузка ветровая. Нормы и метод определения (с Поправкой) URL: http://docs.cntd.ru/document/1200007607. (дата обращения: 16.07.2020).

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

целесообразно ограничить верхнее значение диапазона настройки определяемой анемометром скорости ветра 30 м/с.

Минимальная допустимая рабочая скорость была найдена для стреловых кранов Liebherr. Она составила 7 м/с [6]. Так как оператора крана необходимо заблаговременно предупредить об усилении ветра, чтобы он успел отреагировать на его усиление (например о достижении 80% от допустимой), то минимальный порог определения скорости следует принять меньше 7 м/с. Нижнюю границу диапазона назначим 5 м/с (80% от 7 м/с).

Далее рассмотрим необходимость определения средней скорости ветра и скорости порывов. Согласно [19, 20] существует 2 основных типа ветра: устойчивый порывистый и шквалистый. При устойчивом порывистом 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 нарастание средней скорости ветра, определенной за достаточно продолжительный по отношению к периоду пульсаций промежуток времени.

Устойчивый порывистый ветер (УПВ) является предсказуемым явлением с той точки зрения, что его среднее значение практически не изменяется, то есть этот режим можно назвать условно стационарным. Переход же к УПВ происходит при нарастании скорости, как в случае шквалистого ветра (ШВ). Чтобы отследить изменение скорости ветра за достаточно продолжительный промежуток времени, необходимо располагать информацией о значениях средней скорости ветра. Прежде всего зададимся периодом осреднения, обеспечивающим фильтрацию коротких по периоду колебаний скорости ветра, но при этом приемлемым с точки зрения получения оперативного прогноза. Общего подхода по определению периода осреднения и единого его значения в различных источниках нет.

Период осреднения составляет от 2 минут[4,5] до 10 минут [7,8]. Более продолжительный период осреднения (10 мин) не позволит достаточно оперативно получить информацию о планомерном нарастании скорости ветра. Поэтому для задачи прогнозирования, а не фиксации значений средней скорости ветра (как в задачах метеорологии), наилучшим из представленного диапазона является меньший период осреднения, то есть 2 мин. Он обеспечивает фильтрацию порывов, кратковременных изменений скорости ветра и вместе с тем отражает динамику развития ветрового процесса.

Но осреднение (за 2 мин) сглаживает значения мгновенной скорости, а если достигается максимально допустимое значение ветра при порыве, то работу крана также следует прерывать. Поэтому кроме определения средней скорости необходимо получать данные о скорости порывов. Между средней скоростью ветра и скоростью порывов имеется связь [21, 22, 23] выраженная статистически полученным коэффициентом, и достижение одной величиной допустимого значения даёт основание полагать, что и вторая в скором времени его достигнет.

В [24, 25] приведены данные о продолжительности порывов. При скоростях ветра 15–20 м/с (в целевом диапазоне измерения) она принимает значения 5–30 сек. Так как при использовании 30-секундного периода осреднения порыва амплитудные значения скорости ветра, достигаемые при большей частоте колебаний, сгладятся, то использование такого продолжительного периода осреднения неприемлемо. Следовательно, необходимо данный период принять равным 5 сек.

Кроме того, хранение непрерывной информации с датчика скорости ветра в течение 2-минутного периода (для подсчёта средней скорости) занимает гораздо больший объём памяти, чем хранение результатов промежуточных осреднений за меньшие промежутки времени. Тогда, если эти промежуточные вычисления будут определяться за интервалы, равные времени осреднения скорости порыва, то удастся совместить две операции и сократить объём памяти и количество требуемых вычислений.

---

[6] Liebherr. Учебная документация. Воздействие ветра при работе крана. URL: https://www.liebherr.com/shared/media/mobile-and-crawler-cranes/brochures/wind-influences/liebherr-influence-of-wind-p403-r04-2017.pdf. (дата обращения 24.04.2020).

[7] СП 20.13330.2011 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85. URL: http://docs.cntd.ru/document/1200088443. (дата обращения 15.02.2020).

[8] СТО 56947007-29.240.055-2010 Методические указания по расчету климатических нагрузок в соответствии с ПУЭ-7 и построению карт климатического районирования. URL: http://docs.cntd.ru/document/1200088443. (дата обращения 15.02.2020).

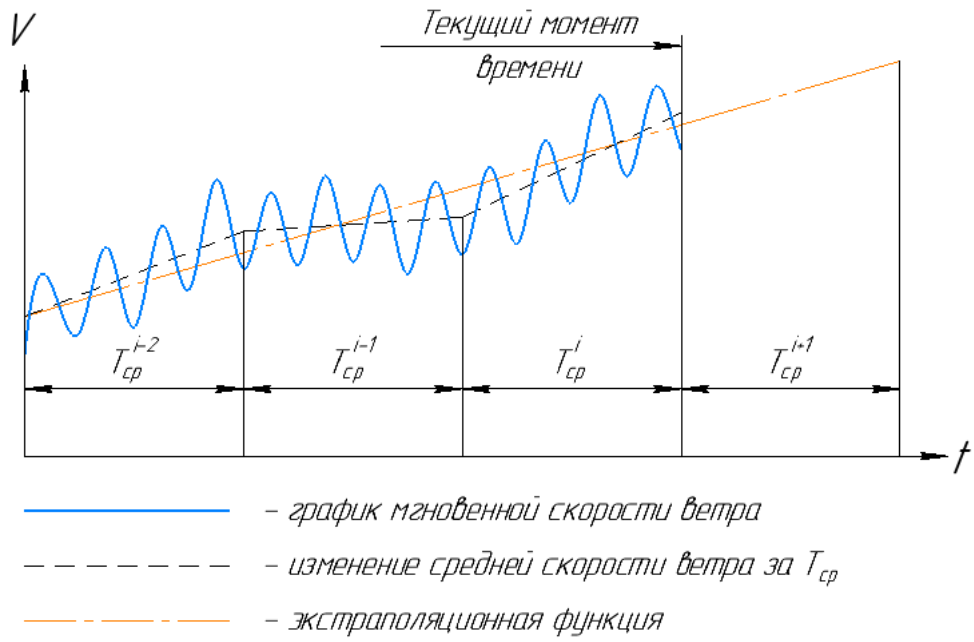

Рисунок 1– Применение экстраполяционной функции для прогнозирования скорости ветра

Figure 1 – Use of extrapolation function for wind speed forecasting

Таким образом установлено, что для анализа ветрового потока необходимо обладать информацией о скорости порывов и средней скорости ветра. На основе обзора литературы и условий использования прибора установлены наилучшие периоды осреднения этих параметров. А на основе анализа нормативно-технической документации приняты пределы измерения скорости ветра.

Рассмотрим реализацию функции определение средней скорости ветра и скорости порыва. В качестве преобразующего элемента (ветер – электрический сигнал) использована вертушка QS-FS 01 с импульсным датчиком. Каждому обороту вертушки соответствует одна ступенька напряжения сигнала, подающегося на вход блока контроля.

Основной цикл программы попеременно выполняет две функции: накопление сигналов и их дальнейшую обработку. Один цикл длится время, равное периоду осреднения скорости порыва ($T_{порыва}$ = 5 сек). Число сигналов, накопленных за $T_{порыва}$, делится на время цикла. Далее осреднённая за 5 сек частота домножается на переводные и тарировочные коэффициенты, таким образом получаем осреднённую скорость порыва. Значения осреднений за $T_{порыва}$ далее используются как промежуточные вычисления в определении средней скорости ветра.

Вычисленное значение скорости за $T_{порыва}$ записывается первым элементом в массив из z элементов. Остальные элементы увеличивают свой номер на 1, а последний удаляется.

$$z = \frac{T_{ср}}{T_{порыва}} = \frac{2[мин]\cdot 60[c]}{5[c]} = 24 \ , \qquad (1)$$

где z – число элементов массива осреднения, $T_{ср}$ – время осреднения для получения средней скорости, $T_{порыва}$ – время осреднения для получения скорости порывов.

Отношение суммы элементов данного массива к его длине считаем средней скоростью ветра за период осреднения ($T_{ср}$ = 2 мин).

$$V_{ср} = \frac{\sum_{i=0}^{z-1} M[i]}{z}, \qquad (2)$$

где $V_{ср}$ – средняя скорость ветра за $T_{ср}$ = 2 мин, $M[i]$ – *i*-й элемент массива осреднения.

На основе данных статьи [17] известно, что при шквалистом ветре в течение времени, кратного периоду осреднения $T_{ср}$, скорость планомерно нарастает. Имея значения средней скорости ветра за несколько промежутков осреднения, применяем метод экстраполяции, что позволит получить прогноз (рисунок 1).

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Информацию о том, какая из функций (линейная, степенная, показательная) наилучшим образом описывает переходные процессы перемещения воздушных масс, на этапе анализа литературы установить не удалось. Поэтому для нахождения наиболее пригодной функции следует в будущем провести серию экспериментов с анемометрами, каждый из которых будет использовать одну из экстраполяционных функций. Далее сравнить наименьшие суммы квадратов невязок (рассчитанных методом наименьших квадратов[9]). Лучше описывать переходные процессы будет та функция, суммы квадратов невязок для которой будут наименьшими (рисунок 2).

Кроме ошибки прогноза, допущенной из-за несоответствия экстраполяционной функции реальному динамическому ветровому процессу $\Delta_{прогноза}$, присутствует ошибка, вызванная особенностью конструкции датчиков скорости ветра чашечного типа $\Delta_{датчика}$. Для того чтобы предъявить обоснованные требования к $\Delta_{прогноза}$, определим значение $\Delta_{датчика}$. Расчётная схема представлена на рисунке 3.

Из дифференциального уравнения

$$\frac{d^2\alpha}{dl^2} - \frac{1}{J} f\left(\frac{d\alpha}{dl}\right) = 0 \qquad (3)$$

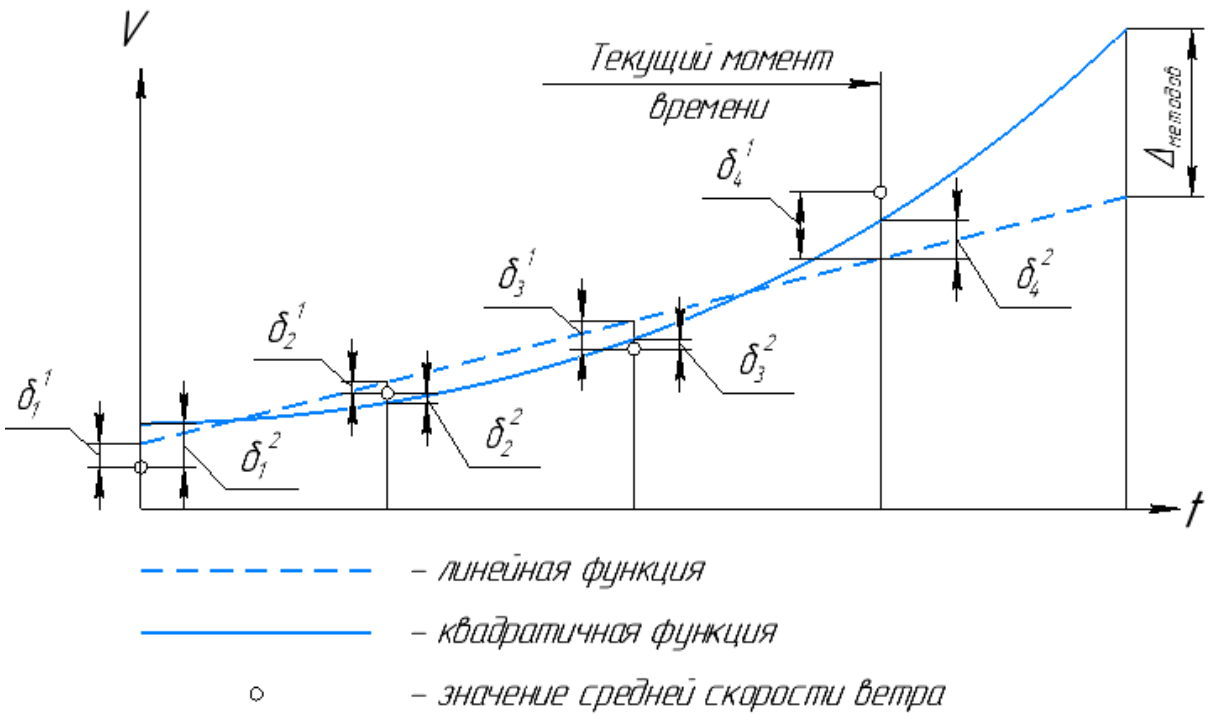

Рисунок 2 – Определение ошибки прогноза при использовании различных экстраполяционных функций:
$\Delta_{методов}$ – разница между прогнозом линейной и квадратичной функции,
δ_j^i – невязка i-го метода в j-й координате

Figure 2 – Determination of predictive error when using different extrapolation functions:
$\Delta_{методов}$ – difference between linear and quadratic function prediction,
δ_j^i – difference i - method in j – coordinate

[9] Кокотушкин Г.А., Федотов А.А., Храпов П.В. Численные методы аглебры и приближения функций: методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Численные методы» / Кокотушкин Г.А., Федотов А.А., Храпов П.В. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 60 с.

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

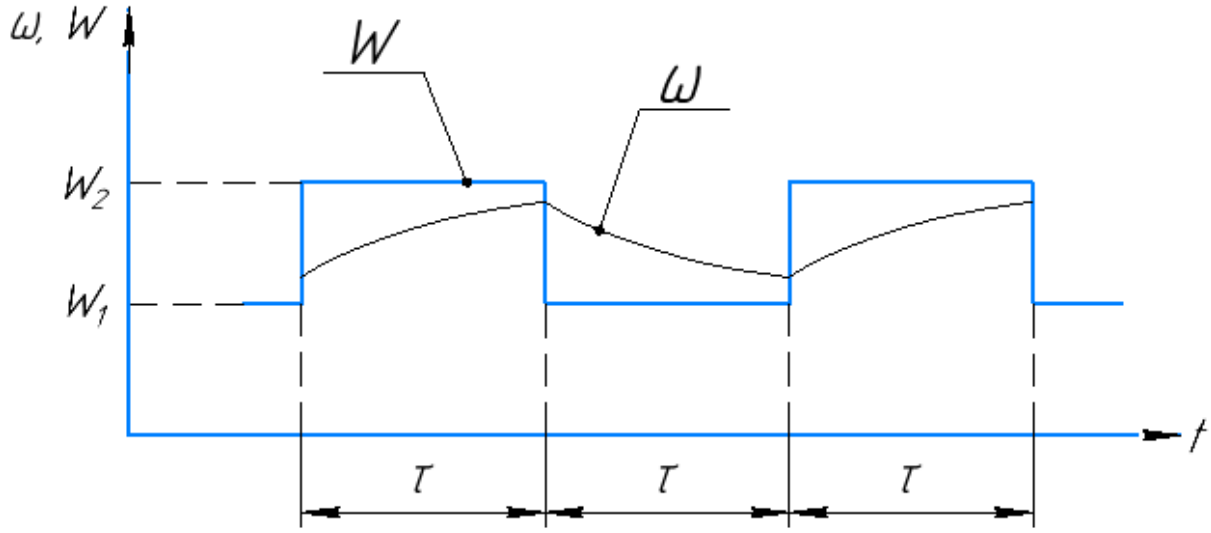

Рисунок 3 – Скорость вращения датчика скорости ветра при циклически изменяющейся скорости ветра: W – скорость ветра, ω – скорость вращения анемометра, τ – время, через которое скорость ветра меняет значение (W_1, W_2)

Figure 3 – Speed of wind rotation sensor at cyclically variable wind speed: W – wind speed, ω – anemometer speed, τ – time of wind speed change (W1, W2)

где α – угол поворота вертушки датчика;

l – произведение скорости ветра на время, то есть длина столба воздуха, прошедшего через анемометр;

J – момент инерции вращающихся частей датчика;

f – коэффициент трения,

получаем выражение, описывающее движение датчика скорости ветра

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega \, \mathrm{e}^{-\frac{Wt}{L}} \qquad (4)$$

где ω_0 – начальная скорость вращения датчика;

$\Delta\omega$ – изменение установившейся скорости вращения датчика в ответ на изменение скорости ветра;

L – путь синхронизации – расстояние, которое пройдёт столб воздуха за время, в течение которого разность между установившейся и текущей угловой скоростью датчика уменьшится в e раз.

Проинтегрировав функцию движения датчика скорости по времени и разделив на исследуемый промежуток времени, получили среднюю угловую скорость анемометра $\Delta\omega_{ср}$. Обозначим как ω среднюю арифметическую скорость из синхронных скоростей, соответствующих скоростям ветра с графика рисунка 3. После преобразований получаем

$$\frac{\omega_{ср}}{\omega} = 1 + \frac{2\left(\frac{\Delta W}{W}\right)}{1-\left(\frac{\Delta W}{W}\right)^2} \frac{L}{W\tau} \frac{\left(1-e^{-\frac{W_1\tau}{L}}\right)\left(1-e^{-\frac{W_2\tau}{L}}\right)}{1-e^{-\frac{W_1\tau}{L}} e^{-\frac{W_2\tau}{L}}} \qquad (5)$$

Второй член правой части всегда положителен, а следовательно, средняя скорость анемометра при пульсирующем ветре всегда больше синхронной скорости анемометра, соответствующей средней арифметической скорости ветра.

Подставив в (5) параметры выбранного датчика, а также параметры ветра, соответствующие самой неблагоприятной ситуации (коэффициент порывистости 1.4, средняя скорость ветра 20 м/с, период колебаний скорости ветра 10 с, продолжительность данного режима 2 мин), получили ошибку датчика $\Delta_{датчика}$ = 9,43% (для АСЦ-3 $\Delta_{датчика}$ = 29,6%).

Таким образом, возможно определить ошибку $\Delta_{прогноза}$, которая находится как разница между допустимой ошибкой анемометра и ошибкой датчика $\Delta_{датчика}$.

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе анализа исследований динамики ветра была составлена таблица соответствия уровней определяемых параметров (скорости порыва, средней скорости и прогнозируемой средней скорости ветра) и сигналов, подаваемых оператору крана (таблица 1).

В качестве органов вывода использованы:

- цифровые табло: «Средняя скорость ветра», «Мгновенная скорость ветра»;
- световые индикаторы: «Стоп», «Опасно ветер», «Опасный прогноз», «Работа». На основе индикации составляется план действий крановщика (например, запрет выполнения следующего цикла подъёма груза).
- звуковой сигнал. Служит для привлечения внимания оператора крана к показаниям цифровых табло и световых индикаторов.
- реле. Использовано для подачи управляющего сигнала на включение сирены, установленной на рабочей площадке. Данное реле также может использоваться для записи о превышении допустимой скорости ветра в регистратор параметров.

Зачастую одновременно удовлетворяются условия по нескольким параметрам (например, очевидно при превышении порога 100% превышается и порог 80%), поэтому то, какой сигнал будет активен и по какому условию он будет снят, определяется согласно приоритету, где 1 – наивысший приоритет, а 5 – наименьший (число приоритетов равно количеству типовых состояний прибора).

Далее следует рассмотреть параметр – задержка снятия сигнализации. Так как может возникнуть ветровая ситуация, при которой скорость колеблется около предельного значения, следует отключать сигнал не сразу после снижения скорости ветра ниже порогового значения активации режима. Иначе прибор будет подавать сигнал при каждом превышении с частотой колебания скорости ветра и мешать оператору (рисунок 4). Для каждого случая было определено своё значение величины задержки снятия сигнализации.

Таблица 1
Типы сигналов в зависимости от ветровой обстановки

Table 1
Wind-dependent signal types

Средняя скорость	Порыв	Сигнал прибора	Приоритет
	100%	«Стоп», непрерывная звуковая сигнализация, замыкается реле. Снятие через 30 сек после последнего $V_{порыва}$=100%	1
100%		«Стоп», непрерывная звуковая сигнализация, замыкается реле. Снятие через 2 мин после не превышения $V_{ср}$ = 95%	2
	90%	«Опасно ветер», трёхкратный звуковой сигнал. Снятие индикации через 30 с после снижения $V_{порыва}$ ниже 80%	3
80%		«Опасно ветер», трёхкратный звуковой сигнал. Снятие индикации через 1 мин после снижения $V_{ср}$ до 75%	4
100% через (2–5) мин		«Опасный прогноз», трёхкратный звуковой сигнал. Снятие индикации через 2 мин	5

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

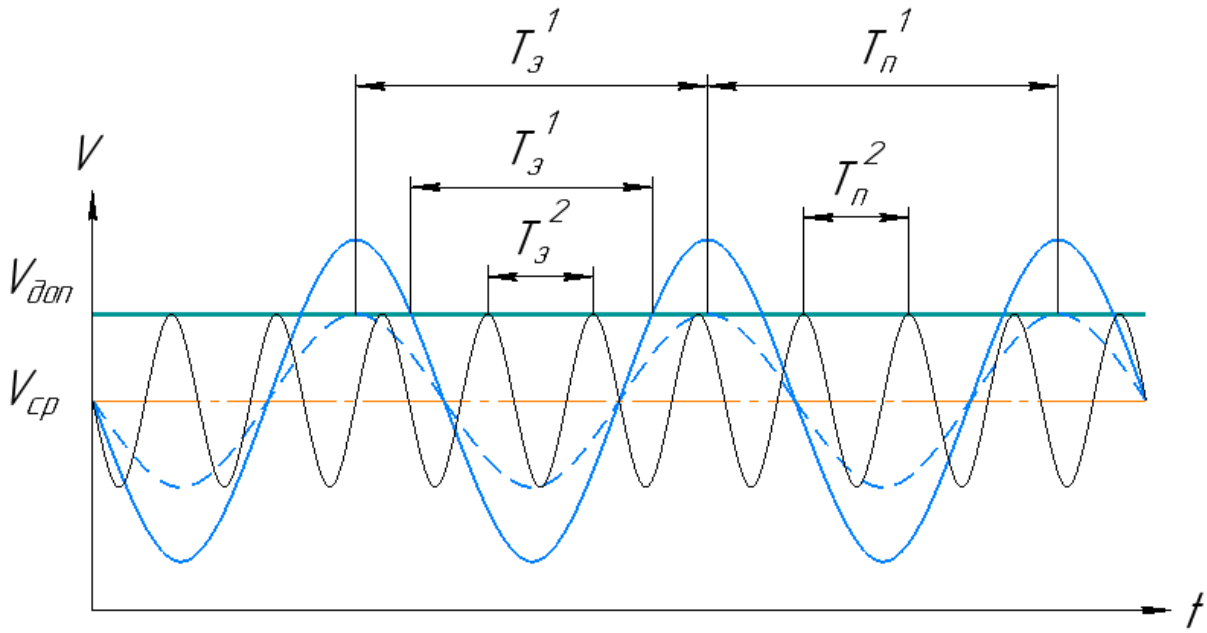

Рисунок 4 – Связь периода и амплитуды колебаний скорости ветра и задержки снятия сигнала: $T_з$ – время задержки (при которой сигнализация будет подаваться непрерывно), $T_п$ – период колебаний, 1 – колебания с наибольшим периодом, 2 – колебания с наименьшим периодом, $V_{доп}$ – допустимая скорость ветра, $V_{ср}$ – средняя скорость ветра

Figure 4 – The relationship between the period and amplitude of the wind speed and the signal removal delay is as follows: $T_з$ – the delay time (at which the alarm will be continuously activated), $T_п$ – the period of the oscillations, 1 – the period with the greatest period, 2 – the period of the oscillations, $V_{доп}$ – permissible wind speed, $V_{ср}$ – average wind speed

Обоснование принятых порогов и значений в описанных типовых случаях (см. таблицу 1):

Превышение по скорости порыва. Порыв достиг значения 100% от допустимой скорости. Согласно [16] необходимо включить сигнализацию, соответствующую режиму «Стоп». Предположим, что в данный момент действует устойчивый порывистый ветер. Значит мгновенная скорость ветра колеблется с периодом 5 – 30 сек [17].

Рассмотрим пограничный случай. Колебания скорости достигают максимума на уровне допустимой скорости. Тогда сигнал на запрет работы будет активироваться с частотой колебаний ветра. Следовательно, чтобы избежать многократного включения-выключения сигнализации (что усложнит работу оператора крана), устанавливаем задержку снятия сигнализации. Её величина должна быть не меньше наибольшего периода колебаний скорости ветра, то есть 30 сек [17]. Тогда при таком периоде к моменту снятия сигнализации уже снова достигнется порог срабатывания (и сигнал запрета работы прерываться не будет), а для колебаний большей частоты ещё раньше.

Превышение по средней скорости. Средняя скорость достигла 100%. Сигнализация «ОПАСНО» уже активирована, так как для достижения $V_{ср}$ = 100% был превышен $V_{порыва}$ = 100%. Снятие сигнализации происходит через 2 мин после последнего снижения $V_{ср}$ до 95%. Если менее чем за 30 сек до отключения сигнализации реализуется случай 1, то отключение сигнализации осуществляется по его инструкции, как у случая с большим приоритетом.

Превышение предварительного порога по скорости порыва. Скорость порыва достигла $V_п$ = 90%. Включается индикация «Опасно ветер» и однократный звуковой сигнал (предупредительная сигнализация о повышении скорости ветра). Отключение индикации через 30 сек после снижения скорости порыва ниже 80%.

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Превышение предварительного порога по средней скорости. Средняя скорость ветра достигла 80% от допустимой[7]. В [17] на основе наблюдений за скоростью ветра установлено, что наиболее вероятное отношение порыва к средней скорости ветра принимает значение 1,23…1,4. При достижении $V_{ср}$ = 80% от допустимой скорости ожидаются порывы 98,4…112%. Это говорит о потенциально опасной ситуации. Следует включить световую индикацию «Опасно ветер» и подать однократный звуковой сигнал, чтобы привлечь внимание оператора крана к показаниям анемометра. Включение данного режима означает, что не следует поднимать груз с большой парусностью или осуществлять работы, предполагающие длительное удержание или перемещение груза. Отключение этого режима происходит через 2 мин после снижения Vср до 75%.

Защита от шквалистого ветра (прогноз). Программно предусмотрено 3–5 переменных, в которых последовательно хранятся $V_{ср}$ с интервалом в 2 мин. С помощью метода наименьших квадратов строится экстраполяционная функция. По найденной функции определяется предполагаемое значение скорости ветра на следующие 2–5 мин. Если оно превысит 100% от допустимой скорости ветра, то включается световая индикация «Опасный прогноз» и подаётся однократный звуковой сигнал, чтобы оператор крана обратил внимание на индикацию.

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведён анализ современных методик определения и прогнозирования скорости ветра. Определены необходимые параметры и интервалы их измерения для прогнозирования ветровой обстановки на подъёмных сооружениях. Установлены некоторые зависимости между этими параметрами.

Разработан алгоритм работы кранового анемометра. Описана функция осреднения порывов за $T_{порыва}$ и значения средней скорости за $T_{ср}$. Приведены необходимые устройства вывода информации прибора, которые будут снабжать оператора крана достаточной информацией. Составлена таблица состояний индикации в зависимости от ветровой обстановки, установленной на основе показаний скорости порывов, средней и прогнозируемой средней скорости ветра. Введён параметр времени задержки снятия сигнализации.

В дальнейшем следует провести оценку качества прогноза, полученного с использованием различных экстраполяционных функций. Также необходимо проверить правильность назначения времени снятия сигнализации и уровней срабатывания.

На данный момент предприятием ЗАО ИТЦ «КРОС» изготовлен опытный образец анемометра, использующего описанные в данной статье принципы. Прибор соответствует всем требованиям нормативно-технической документации. Дальнейшая работа по совершенствованию алгоритма его работы позволит ещё больше повысить безопасность технологических процессов, осуществляемых с использованием подъёмных сооружений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Инденбаум А.И., Котельников В.С., Жуков В.Г. Основные причины аварий башенных кранов и меры для их устранения // Безопасность труда в промышленности. 2005. №3. С. 22-29.

2. Антипин В.А., Елизарьева Е.Н. Анализ опасностей при эксплуатации башенного крана // Актуальные проблемы социального, экономического и информационного развития современного общества. 2016. С. 21-23.

3. Гнибеда. И., Боянов К., Карманов С. Нарушение условий эксплуатации башенных кранов // Технадзор. 2015. №11. С. 159-160.

4. Кузнецов Ф.А., Сладкова Л.А. Способ обеспечения устойчивости башенных кранов на основе исключения резонанса частот крана и ветровых порывов // Наземные транспортно-технологические комплексы и средства. 2019. С. 115-119.

5. Ерофеев Н.И., Подобед В.А. Работа подъёмных кранов при сильном ветре // Безопасность труда в промышленности. 1977. №3. С. 37-38.

6. Тимаков В.И., Тимаков М.В. Состояние промышленной безопасности при эксплуатации грузоподъёмных кранов на объектах, подконтрольных Ростехнадзору // Известия Юго-западного государственного университета. Серия: техника и технологии. 2017. №1. С. 27-41.

7. Ищенко А.Р., Евдокимова М.С. Обеспечение устойчивости свободно стоящих башенных кранов при ветровом нагружении // Труды университета. 2019. №3. С. 153-157.

8. Синельщиков А.В., Джалмухамбетов А.И. Развитие методов расчета устойчивости башенных кранов // Вестник МГСУ. 2017. №12. С. 1342-1351.

9. Сорокин П.А., Мишин А.В., Хряков К.С. Разработка и сравнение систем контроля устойчивости башенных кранов. Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. Вып. 11. Ч. 2.

10. Сорокин П.А., Мишин А.В. Система безопасности башенных кранов с автоматическим контролем их устойчивости // Подъемно-транспортное дело. 2017. №2–3. С. 20-21.

11. Сорокин П.А., Мишин А.В. Нейросетевой алгоритм системы автоматического контроля устойчивости башенных кранов // Автоматизация и современные технологии. 2014. №4. С. 7-12.

12.Сорокин П.А., Мишин А.В. Система контроля устойчивости башенных кранов от опрокидывания // Известия тульского государственного университета // Технические науки. 2013. №7–2. С. 325-332.

13. Обыденов В.А. Устойчивость стационарных башенных кранов в условиях ветрового нагружения. Тула, 2010. 18 с.

14. Моренко К.С. Применение цепей Маркова при прогнозировании динамики скорости ветра // Вестник аграрной науки Дона. 2015. 4 (32).

15. Гуррера Д. Стохастическое моделирование прогнозирования скорости ветра. Нижний Новгород, 2012. 16 с.

16. Подобед В.А., Подобед Н.Е. Предупреждение риска при эксплуатации кранов при ветровых нагрузках в морских портах // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2006. №3. С. 531-533.

17. Подобед В.А. Математическое моделирование ветровых нагрузок на портовые портальные краны // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2006. Т. 9. № 2. С. 318-331.

18. Подобед В.А. Теоретические исследования основных показателей работы портального крана «Альбрехт» при динамическом воздействии ветра // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2006. №3. С. 522-530.

19. Уфимцев Е.М. Временной анализ физически и конструктивно нелинейных колебаний ферменных конструкций при действии импульсной нагрузки // Строительство и экология: теория, практика, инновации. 2015. Ч.1. С. 102-106.

20. Подобед В.А. Повышение эффективности использования портовых кранов при ветровых нагрузках. Москва, 2007. 47с.

21. Аджиев А.Х., Петренко В.А., Корнилов Ю.В. Прогнозы климатических характеристик для инженерно-геологических изысканий на зимний период 2014 года в Сочи // Геориск. 2010. №3. С. 58-63.

22. Подобед В.А. Работа портовых кранов при ветровых нагрузках // Морской флот. 2006. № 6. С. 68-70.

23. Подобед. Н.Е., Подобед В.А. Безопасность производства перегрузочных работ кранами в морских портах при повышенных ветровых нагрузках // Вестник мурманского государственного технического университета. 2011. №3. С. 496-498.

24. Меньшиков В.И., Подобед. Н.Е., Подобед В.А. Математическое моделирование ветровых нагрузок на механизмы передвижения портальных кранов с прямой стрелой // Вестник мурманского государственного технического университета. 2009. № 1. С. 27-23.

25. Новицкий М.А., Хачатурова Л.М., Кулижникова Л.К., Мацкевич М.К. Максимальные пульсации направления ветра за ограниченные промежутки времени на высотах до 300 м по данным наблюдений на высотной мачте // Метеорология и гидрология. 2007. №3. С. 33-42.

REFERENCES

1. Indenbaum A.I., Kotel'nikov V.S., Zhukov V.G. Osnovnyye prichiny avariy bashennykh kranov i mery dlya ikh ustraneniya [The main causes of accidents of tower cranes and measures for their elimination]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2005; 3: 22-29. (in Russian)

2. Antipin V.A., Yelizar'yeva Ye.N. Analiz opasnostey pri ekspluatatsii bashennogo krana [Analysis of hazards during the operation of a tower crane]. *Aktual'nyye problemy sotsial'nogo, ekonomicheskogo i informatsionnogo razvitiya sovremennogo obshchestva*. 2016. 21-23. (in Russian)

3. Gnibeda. I., Boyanov K., Karmanov S. Narusheniye usloviy ekspluatatsii bashennykh kranov [Violation of the operating conditions of tower cranes]. *Tekhnadzor.* 2015; 11: 159-160.

4. Kuznetsov F.A., Sladkova L.A. Sposob obespecheniya ustoychivosti bashennykh kranov na osnove isklyucheniya rezonansa chastot krana i vetrovykh poryvov [A method of ensuring the stability of tower cranes on the basis of eliminating the resonance of the crane frequencies and wind gusts]. *Nazemnyye transportno-tekhnologicheskiye kompleksy i sredstva.* 2019. 115-119.

5. Yerofeyev N.I., Podobed V.A. Rabota pod"yomnykh kranov pri sil'nom vetre [The work of cranes in strong winds]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 1977; 3: 37-38.

6. Timakov V.I., Timakov M.V. Sostoyaniye promyshlennoy bezopasnosti pri ekspluatatsii gruzopod"yomnykh kranov na ob"yektakh, podkontrol'nykh Rostekhnadzoru [The state of industrial safety during the operation of cranes at facilities controlled by Rostekhnadzor]. *Izvestiya Yugo-zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: tekhnika i tekhnologii*. 2017; 1: 27-41.

7. Ishchenko A.R., Yevdokimova M.S. Obespecheniye ustoychivosti svobodno stoyashchikh bashennykh kranov pri vetrovom nagruzhenii [Ensuring the stability of free-standing tower cranes under wind loading]. *Trudy universiteta. Proceedings of the University*. 2019; 3: 153-157.

8. Sinel'shchikov A.V., Dzhalmukhambetov A.I. Razvitiye metodov rascheta ustoychivosti bashennykh kranov [Development of methods for calculating the stability of tower cranes]. *Vestnik MGSU*, 2017; 12: 1342-1351.

9. Sorokin P.A., Mishin A.V., Khryakov K.S. Razrabotka i sravneniye sistem kontrolya ustoychivosti bashennykh kranov [Development and comparison of tower crane stability control systems]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki* . 2016; 11(2).

10. Sorokin P.A., Mishin A.V. Sistema bezopasnosti bashennykh kranov s avtomaticheskim kontrolem ikh ustoychivosti [Security system of tower cranes with automatic control of their stability]. *Pod"yemno-transportnoye delo*. 2017; 2-3: 20-21.

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

11. Sorokin P.A., Mishin A.V. Neyrosetevoy algoritm sistemy avtomaticheskogo kontrolya ustoychivosti bashennykh kranov [Neural network algorithm for the automatic stability control system for tower cranes]. *Avtomatizatsiya i sovremennyye tekhnologii*. 2014; 4: 7-12.

12. Sorokin P.A., Mishin A.V. Sistema kontrolya ustoychivosti bashennykh kranov ot oprokidyvaniya [System for monitoring the stability of tower cranes against overturning]. *Izvestiya tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki*. 2013: 2: pp. 325-332.

13. Obydenov V.A. Ustoychivost' statsionarnykh bashennykh kranov v usloviyakh vetrovogo nagruzheniya [Stability of stationary tower cranes in the conditions of wind loading]. Tula, 2010. 18 p.

14. Morenko K.S. Primeneniye tsepey Markova pri prognozirovanii dinamiki skorosti vetra [Application of Markov Chains for Predicting Wind Speed Dynamics]. *Vestnik agrarnoy nauki Dona.* 2015; 4(32).

15. Gurrera D. Stokhasticheskoye modelirovaniye prognozirovaniya skorosti vetra [Stochastic modeling of forecasting wind speed]. Nizhniy Novgorod, 2012, 16 p.

16. Podobed V.A., Podobed N.Ye. Preduprezhdeniye riska pri ekspluatatsii kranov pri vetrovykh nagruzkakh v morskikh portakh [Risk prevention during operation of cranes under wind loads in seaports]. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2006; 3: 531-533.

17. Podobed V.A. Matematicheskoye modelirovaniye vetrovykh nagruzok na portovyye portal'nyye krany [Mathematical modeling of wind loads on port gantry cranes]. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2006; 9(2): 318-331.

18. Podobed. V.A. Teoreticheskiye issledovaniya osnovnykh pokazateley raboty portal'nogo krana "Al'brekht" pri dinamicheskom vozdeystvii vetra [Theoretical studies of the main performance indicators of the "Albrecht" gantry crane under dynamic influence of the wind]. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2006; 3: 522-530.

19. Ufimtsev Ye.M. Vremennoy analiz fizicheski i konstruktivno nelineynykh kolebaniy fermennykh konstruktsiy pri deystvii impul'snoy nagruzki. Chast' 1: matematicheskiye modeli vremennogo analiza nelineynykh kolebaniy [Time analysis of physically and structurally nonlinear vibrations of truss structures under the action of a pulsed load. Part 1: mathematical models of temporal analysis of nonlinear oscillations]. Stroitel'stvo i ekologiya: teoriya, praktika, innovatsii, 2015, pp. 102-106.

20. Podobed V.A. Povysheniye effektivnosti ispol'zovaniya portovykh kranov pri vetrovykh nagruzkakh [Increasing the efficiency of using harbor cranes under wind loads]. Moskow, 2007. 47 p.

21. Adzhiyev A.KH., Petrenko V.A., Kornilov YU.V. Prognozy klimaticheskikh kharakteristik dlya inzhenerno-geologicheskikh izyskaniy na zimniy period 2014 goda v Sochi [Predictions of climatic characteristics for engineering and geological surveys for the winter period of 2014 in Sochi]. *Georisk.* 2010; 3: 58-63.

22. Podobed V.A. Rabota portovykh kranov pri vetrovykh nagruzkakh [Operation of port cranes under wind loads]. *Morskoy flot.* 2006; 6: 68-70.

23. Podobed. N.Ye., Podobed V.A. Bezopasnost' proizvodstva peregruzochnykh rabot kranami v morskikh portakh pri povyshennykh vetrovykh nagruzkakh [Safety of handling operations by cranes in seaports at increased wind loads]. *Vestnik murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta.* 2011; 3: 496-498.

24. Men'shikov V.I., Podobed. N.Ye., Podobed V.A. Matematicheskoye modelirovaniye vetrovykh nagruzok na mekhanizmy peredvizheniya portal'nykh kranov s pryamoy streloy [Mathematical modeling of wind loads on the mechanisms of movement of portal cranes with a straight boom*]. Vestnik murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2009; 1: 27-23.

25. Novitskiy M.A., Khachaturova L.M., Kulizhnikova L.K., Matskevich M.K. Maksimal'nyye pul'satsii napravleniya vetra za ogranichennyye promezhutki vremeni na vysotakh do 300 m po dannym nablyudeniy na vysotnoy machte [Maximum pulsations of the wind direction for limited time intervals at heights of up to 300 m according to observations on a high-altitude mast]. *Meteorologiya i gidrologiya.* 2007; 3: 33-42.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Рощин Виталий Андреевич – инженер ЗАО ИТЦ «КРОС» (г. Ивантеевка, e-mail: roshchinva@mail.ru).

Иванов Сергей Дмитриевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Подъёмно-транспортные системы» Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (Москва, e-mail: rk4@bmstu.ru).

Назаров Александр Николаевич – аспирант 1-го курса кафедры «Подъёмно-транспортные системы» Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (Москва, e-mail: alexnazavr@yandex.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vitaly A. Roshchin – Engineer of the KROS Engineering and Technical Center , Ivanteevka, Russia (e-mail: roshchinva@mail.ru).

Sergey D. Ivanov – Cand. of Sci., Associate Professor of the Hoisting and Transport Systems Department, N.E. Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia (e-mail:rk4@bmstu.ru).

Alexander Nazarov – 1-year postgraduate, the Hoisting and Transport Systems Department N.E. Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia (e-mail: alexnazavr@yandex.ru).

ВКЛАД СОАВТОРОВ

С.Д. Иванов – теоретическое обоснование работы, общее руководство, анализ полученных результатов.

А.Н. Назаров – анализ нормативной документации, математическое моделирование ветрового потока.

В.А. Рощин – анализ результатов моделирования, разработка системы сигналов анемометра.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

S.D. Ivanov – theoretical justification of the research, general management, analysis of the results.

A.N. Nazarov – analysis of regulatory documents, mathematical modeling of the wind flow.

V.A. Roshchin – analysis of the modeling results, development of anemometer signal system.

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal