РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА УСТОЙЧИВОСТИ БАШЕННЫХ КРАНОВ

А.В. Синельщиков, А.И. Джалмухамбетов

*Астраханский государственный архитектурно-строительный университет (АГАСУ),
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, д. 18*

Башенные краны являются одним из основных средств выполнения перегрузочных работ при строительстве. Для обеспечения устойчивости требуется соблюдение условия непревышения удерживающего опрокидывающего момента. Расчет указанных моментов производится с использованием эмпирических коэффициентов и достаточно трудоемок. Кроме этого, нормативная методика рассматривает только статическое положение крана и не учитывает наличия динамических переходных процессов, обусловленных работой крана (подъем и раскачивание груза, поворот стрелы), и динамической составляющей внешнего нагружения (например, от воздействия ветра при различной ориентации крана). В работе предлагается способ определения коэффициента устойчивости башенного крана на основе действующих реакций в опорах — местах контакта ходовых колес и кранового рельсового пути, что позволяет на этапе проектирования исследовать устойчивость башенного крана при переменных внешних нагрузках и эксплуатационных состояниях.

Предмет исследования: безопасность эксплуатации башенных кранов в части выполнения нормативных требований обеспечения их устойчивости как на этапе проектирования, так и на этапе эксплуатации.

Цели: повышение безопасности эксплуатации башенных кранов на основе совершенствования методики их проектирования в части обеспечения статической и динамической устойчивости.

Материалы и методы: анализ и обобщение нормативной базы и современных научных работ по обеспечению безопасной эксплуатации башенных кранов, метод вычислительного эксперимента.

Результаты: предложена формула для расчета устойчивости башенных кранов с использованием возникающих реакций в опорах крана в месте контакта ходового колеса и рельсового пути.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: башенный кран, устойчивость, безопасность, вычислительный эксперимент, метод конечных элементов

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Синельщиков А.В., Джалмухамбетов А.И. Развитие методов расчета устойчивости башенных кранов // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. Вып. 12 (111). С. 1342–1351.

DEVELOPMENT OF METHODS FOR STABILITY ANALYSIS OF TOWER CRANES

A.V. Sinel'shchikov, A.I. Dzhal mukhambetov

*Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering (ASUACE),
18 Tatishcheva st., Astrakhan, 414056, Russian Federation*

Tower cranes are one of the main tools for execution of reloading works during construction. Design of tower cranes is carried out in accordance with RD 22-166-86 "Construction of tower cranes. Rules of analysis", according to which to ensure stability it is required not to exceed the overturning moment upper limit. The calculation of these moments is carried out with the use of empirical coefficients and quite time-consuming. Moreover, normative methodology only considers the static position of the crane and does not take into account the presence of dynamic transients due to crane functioning (lifting and swinging of the load, boom turning) and the presence of the dynamic external load (e.g. from wind for different orientations of the crane). This paper proposes a method of determining the stability coefficient of the crane based on acting reaction forces at the support points — the points of contact of wheels with the crane rail track, which allows us, at the design stage, to investigate stability of tower crane under variable external loads and operating conditions.

Subject: the safety of tower cranes operation with regard to compliance with regulatory requirements of ensuring their stability both at the design stage and at the operational stage.

Research objectives: increasing the safety of operation of tower cranes on the basis of improving methodology of their design to ensure static and dynamic stability.

Materials and methods: analysis and synthesis of the regulatory framework and modern research works on provision of safe operation of tower cranes, the method of numerical simulation.

Results: we proposed the formula for analysis of stability of tower cranes using the resulting reaction forces at the supports of the crane at the point of contact of the wheel with the rail track.

KEY WORDS: tower crane, stability, safety, numerical simulation, finite element method

FOR CITATION: Sinel'shchikov A.V., Dzhal mukhambetov A.I. Razvitie metodov rascheta ustoychivosti bashennykh kranov [Development of methods for stability analysis of tower cranes]. Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2017, vol. 12, issue 12 (111), pp. 1342–1351.

ВВЕДЕНИЕ

В России при строительстве более 98 % всех подъемно-транспортных работ осуществляется с использованием башенных кранов [1]. Вместе с тем прочность и устойчивость башенных кранов при внешних воздействиях все еще остается предметом исследования. Башенные краны, в отличие от других видов грузоподъемных машин, из-за особенностей конструкции — большой высоты при незначительных колее и базе (как правило, не более 6 м) — имеют повышенную чувствительность к условиям эксплуатации, в частности к перегрузу, разнице в высоте ниток кранового рельсового пути и резкому изменению внешней нагрузки. Аварии башенных кранов составляют 40 % общего количества аварий стреловых грузоподъемных кранов. Наиболее часто (30 % случаев) причиной аварий башенных кранов являются нарушения условий безопасной эксплуатации, связанные с неисправностью ограничителей грузоподъемности и перегрузкой башенного крана, неудовлетворительным состоянием крановых путей и проведением работ при скорости ветра, превышающей предельные значения. При этом под аварией понимается потеря устойчивости башенного крана и его опрокидывание, иногда с предшествующим разрушением элементов несущих металлоконструкций. Падения башенных кранов фиксируются регулярно и происходят даже при соблюдении всех правил эксплуатации и требований безопасности.

Современные требования проектирования башенных кранов основаны на использовании введенного в действие в 1987 г. РД 22-166-86¹: башенный кран должен быть устойчив при действии опасной комбинации нагрузок относительно ребра опрокидывания, при котором кран по устойчивости максимально приближается к предельному состоянию. Для обеспечения устойчивости крана должно выполняться неравенство

$$kM^H \leq m_0 M^P, \quad (1)$$

где k — коэффициент перегрузки; M^H — момент от нормативных составляющих нагрузок; m_0 — коэффициент условий работы; M^P — расчетная несущая способность по моменту для задач устойчивости равная удерживающему моменту $M_{уд}$. Для практического применения удобно использовать коэффициент устойчивости, который имеет вид

$$K_y = \frac{m_0 M^P}{k M^H}. \quad (2)$$

¹ РД 22-166-86 Краны башенные строительные. Нормы расчета

Следует отметить, что в формулах (1) и (2) коэффициент перегрузки k , кроме проектной надежности, учитывает среднеквадратическое значение случайной нагрузки и всегда по значению больше единицы, а коэффициент условий работы m_0 в большинстве случаев по значению меньше единицы. Формулы и справочные таблицы для вычисления коэффициентов k и m_0 стандарта РД 22-166-86 отражают большой инженерный опыт проектирования и эксплуатации башенных кранов, но в то же время два раза «корректируют» расчетное соотношение (1) — увеличивают момент от нормативных составляющих нагрузок M^H и уменьшают расчетную несущую способность по моменту M^P . Кроме этого, определение значений, входящих в формулу (1), требует от проектировщика вычисления большого количества параметров, некоторые из которых зависят от исполнения крана, вылета и ряда параметров меняющихся при выполнении погрузочно-разгрузочных работ.

Несмотря на учет среднеквадратических значений случайной нагрузки, которая может быть обусловлена неровностями кранового рельсового пути, порывами ветра, раскачиванием груза на подвесе, формула (1) не учитывает гибкость конструкции башенного крана, а также наличие значительно большее число собственных форм колебаний башенного крана в низкочастотной области, по сравнению с тем, что предлагается учитывать в стандарте.

Таким образом, нормативный способ расчета устойчивости башенных кранов представляет достаточно трудоемкую процедуру для проектировщика и не учитывает возможности современных методов расчетного анализа несущих конструкций инженерных сооружений, которые позволяют построить более точные модели башенных кранов и провести уточненный анализ их устойчивости при статических нагрузках. Нормативная модель устойчивости башенного крана (1) не учитывает различные эксплуатационные состояния башенного крана, а также возникновение переходных процессов в начале подъема груза, поворота стрелы.

В качестве исходных данных для расчета коэффициентов устойчивости башенного крана предлагается использовать реакции в месте контакта ходовых колес с крановым рельсовым путем.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Исследованиям в области прочности, устойчивости и влияния на устойчивость внешнего динамического нагружения посвящены работы А.А. Вайнсона, В.А. Подобеда, М.Ф. Барштейна, А.Н. Орлова, А.А. Зарецкого, Л.А. Невзорова, В.А. Обыденкова, П.А. Сорокина, А.В. Редькина и др.

Так, на основе теоретических исследований и проведенного математического моделирования

разработан метод стабилизации устойчивости стационарного башенного крана в условиях высоких ветровых нагрузок с использованием системы управления положением стрелы, позволяющей обеспечить его устойчивость в условиях ветровых нагрузок [3]. Анализ поведения башенного крана при максимально допустимой скорости ветра 24 м/с в рабочем состоянии крана и 33 м/с в нерабочем показал, что, исходя из значений коэффициентов запаса устойчивости башенного крана, отклонение стрелы крана от параллельного положения относительно ветрового потока в нерабочем состоянии не должно превышать 30°. В работе [2] с использованием аппарата нечеткой логики разработаны алгоритмы прогнозирования увеличения скорости ветрового потока в рабочем состоянии крана, регулирования устойчивости при превышении предельно допустимой скорости ветра для стационарных башенных кранов в рабочем состоянии, а также алгоритмы управления для поддержания параллельного положения стрелового устройства относительно направления ветра в нерабочем состоянии. Разработано устройство безопасности, способное повысить эксплуатационную производительность и уровень безопасности производства погрузочных работ, выполняемых стационарными башенными кранами в условиях высоких ветровых нагрузок, путем стабилизации положения стрелового устройства относительно ветрового потока в рабочем и нерабочем состояниях.

В трудах [3, 4] предлагается система корректировки и поддержания заданного положения стрелового устройства относительно ветрового напора для обеспечения устойчивости стационарного башенного крана в условиях действия порывов ветра. В указанных работах приводится обоснование применения упреждающего принудительного воздействия на стационарный башенный кран для обеспечения его устойчивости при изменении динамики ветровых потоков. Управление стреловым устройством производится дополнительными устройствами — гидродинамическими муфтами и вспомогательным приводом, обеспечивающими устойчивость путем введенной в кинематическую схему поворота башни дополнительной жесткости и упреждающим принудительным поворотом стрелы крана вспомогательным приводом.

Предлагается развитие модели случайного динамического воздействия ветровых нагрузок с целью защиты башенных кранов от недопустимых колебаний и разрушений, а также рассматриваются вопросы разработки системы обеспечения устойчивости с целью предотвращения опрокидывания башенных кранов на основе нейросетевых и логических алгоритмов [5].

Анализ научных работ за последние годы показал, что усилия исследователей сосредоточены на

совершенствовании моделей внешнего нестационарного нагружения, поиске наиболее нагруженных элементов металлоконструкции башенных кранов определенной конструкции и принятии инженерных и конструктивных решений по снижению возникающих в них напряжений, а также на разработке адаптивных систем управления башенными кранами для снижения влияния внешних нагрузок. Большинство авторов указывают на несовершенство методов проектирования башенных кранов, не позволяющих учесть податливость металлоконструкции крана и наличие дополнительных, в том числе пиковых, нагрузок.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Более точную информацию об устойчивости башенного крана может дать непосредственный анализ реакций, возникающих в опорах крана — в месте контакта ходовых колес с крановым рельсовым путем. Расчетный анализ реакций при соблюдении требований может быть осуществлен для различных эксплуатационных положений, а также для пиковых нагрузок, возникающих в результате динамических процессов в момент подъема груза и при повороте стрелы.

Для расчета устойчивости башенного крана на основании анализа реакции в опорах предлагается использовать следующую формулу для расчета коэффициента устойчивости [6]:

$$K_y = 1 + R_2^{\min} / R_1^{\min}, \quad (3)$$

где $R_1^{\min}$, $R_2^{\min}$ — соответственно реакции, возникающие в опорах на ребре опрокидывания и опорах противоположного ребру опрокидывания (рис. 1). Расчет реакций в опорах может быть осуществлен как с использованием традиционных методов строительной механики, так и метода конечных элементов.

В настоящей работе авторами проведен расчет и сравнение результатов грузовой устойчивости башенного крана КБМ-401П по нормативной методике и по формуле (3). В качестве метода аппроксимации использован метод конечных элементов, расчетная модель башенного крана КБМ-401П построена на основе фактического замера несущих металлоконструкций крана, установленного в черте города Астрахань (рис. 2).

Передвижной (на рельсовом ходу) полноповоротный башенный кран КБМ-401П предназначен для механизации строительно-монтажных работ при возведении жилых и промышленных зданий. Кран предназначен для работы при температуре окружающего воздуха от –40 до +40 °С. Грузовая характеристика башенного крана КБМ-401П показана на рис. 3.

Рис. 1. Реакции, возникающие в опорах башенного крана на ребре опрокидывания и опорах противоположных ребру опрокидывания

Основные характеристики крана КБМ-401П следующие:

Характеристика	Значение
Изготовитель	ПО «Ржевбашкран»
Год изготовления	1994
Допустимая скорость ветра, м/с:	
для рабочего состояния (с учетом порывов ветра)	21
для нерабочего состояния	I-V ветровой район по ГОСТ 1451-77 ¹
Допустимый уклон кранового пути	0,01
Максимальная грузоподъемность, т	8,0
Максимальный грузовой момент, т·м (кН·м)	160 (1570)
Глубина опускания, м	5
Вылет, м:	
максимальный	30
минимальный	5,6
База, м	6
Колея, м	6
Задний габарит, м	3,8
Наименьший радиус закругления внутреннего рельса, м	7
Скорость подъема (опускания) груза, м/мин	36 (55)
Скорость плавной посадки груза максимальной массы, не более, м/мин	5
Скорость передвижения крана, м/мин	18
Скорость передвижения грузовой тележки (с грузом), м/мин	7 (30)
Частота вращения, об./мин	0,65
Угол поворота, град	1080
Группа режима работы механизмов	3М
Группа режима работы крана по ГОСТ 25546-82 ²	4К
Расчетная нагрузка ходового колеса на рельс, кН	270
Масса, т:	
крана конструктивная	49,7
крана общая	79,7
противовеса	50
Момент, кН*м:	
удерживающий грузовой M_y	2034
удерживающий собственный M_{yc}	1856
опрокидывающий грузовой M_o	1863
опрокидывающий собственный M_{oc}	1536

¹ ГОСТ 1451-77 Краны грузоподъемные. Нагрузка ветровая. Нормы и метод определения

² ГОСТ 25546-82 Краны грузоподъемные. Режимы работы (с Изменением N 1)

Рис. 2. Общий вид башенного крана КБМ-401П

Рис. 3. Грузовая характеристика башенного крана КБМ-401П

Расчетно-динамическая модель башенного крана КБМ-401П (рис. 4, а) состоит из 2526 конечных элементов (1383 стержней, 775 пластины, 30 конечных элементов типа канат, 320 жестких связей, 18 объемных конечных элементов) и 1670 узлов ($n = 10\,020$). Нагрузки от собственного веса конечных элементов металлоконструкции крана задавались в соответствии с плотностью стали $\rho_{ст} = 7850 \text{ кг/м}^3$, для стержневых конечных элементов и канатов — площадью поперечного сечения, длиной; для пластин — площадью и их толщиной.

Линейная распределенная весовая нагрузка определялась для каждого конечного элемента. В расчетно-динамической модели учтены сосредоточенные нагрузки от масс механизмов крана. Полезная нагрузка рабочего состояния для башенного крана КБМ-401П грузоподъемностью $Q = 8 \text{ т}$ задавалась для II расчетного сочетания нагрузок (см. рис. 4, б).

Расчет грузовой устойчивости башенного крана КБМ-401П по методике и по формуле (3) проведен для 23 положений грузовой тележки на вылете от 8 до 30 м с шагом 1 м при грузоподъем-

Рис. 5. Отдельные расчетные положения грузовой тележки башенного крана КБМ-401П с длиной стрелы $L_{ст} = 30$ м на вылете грузовой тележки: а — $L_b = 8$ м (грузоподъемность 8 т); б — $L_b = 15$ м (грузоподъемность 8 т); в — $L_b = 30$ м (грузоподъемность 4,5 т)

ности, соответствующей грузовой характеристике крана (см. рис. 3) без учета ветрового воздействия. На рис. 5 показаны отдельные положения грузовой тележки на вылете грузовой тележки $L_b = 8$ м (грузоподъемность 8 т), $L_b = 15$ м (грузоподъемность 8 т) и $L_b = 30$ м (грузоподъемность 4,5 т).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для каждого из 23 положений грузовой тележки на вылете от 8 до 30 м с шагом 1 м при грузоподъемности, соответствующей грузовой характеристике крана (см. рис. 3), вычислены реакции в опорах —

в месте контакта ходовых колес с рельсовым путем. Реакции в двух ходовых колесах одной тележки суммировались. На рис. 6 показаны обозначения реакций, возникающих в опорах при расчете устойчивости башенного крана, а в табл. 1 — их численное расчетное значение.

Результаты расчета коэффициентов грузовой устойчивости башенного крана КБМ-401П при различных положениях грузовой тележки, полученные по нормативной методике (2) и по формуле (3), приведены в табл. 2. Графическая интерпретация результатов расчета показана на рис. 7.

Рис. 6. Обозначения реакций опор при расчете устойчивости башенного крана

Табл. 1. Реакции, возникающие в опорах при расчете устойчивости башенного крана КБМ-401П в 23 положениях грузовой тележки на вылете от 8 до 30 м с шагом 1 м при грузоподъемности, соответствующей грузовой характеристике крана

Реакции	Вылет, м / Грузоподъемность, т											
	8/8,0	9/8,0	10/8,0	11/8,0	12/8,0	13/8,0	14/8,0	15/8,0	16/7,6	17 /7,1	18/6,7	19/6,3
R_1	266,78	273,62	280,48	287,32	294,18	301,04	307,88	314,74	315,46	313,92	314,98	312
R_2	270,22	277,32	284,44	291,56	298,66	305,78	312,9	320	320,84	319,34	320,48	317,5
R_3	265,8	258,94	252,1	245,24	238,4	231,54	224,7	217,84	215,16	214,24	211,72	212,26
R_4	266,76	259,64	252,52	245,2	238,3	231,18	224,06	216,96	214,16	213,2	210,58	211,12

Реакции	Вылет, м / Грузоподъемность, т											
	20/6,0	21/5,8	22/5,6	23/5,3	24/5,1	25/5,0	26/4,9	27/4,8	28/4,7	29/4,6	30/4,5	
R_1	311,92	315,24	314,36	315,1	313,34	315,62	317,74	319,68	321,48	323,1	324,58	
R_2	317,48	320,94	320,08	320,9	319,12	321,5	323,72	325,76	327,64	329,36	330,9	
R_3	210,86	207,06	206,46	204,74	205,02	202,26	199,66	197,22	194,94	192,82	190,84	
R_4	209,68	205,72	205,1	203,32	203,6	200,74	198,04	195,5	193,12	190,92	188,88	

Табл. 2. Коэффициенты грузовой устойчивости башенного крана КБМ-401П при различных положениях грузовой тележки, полученные по нормативной методике (2) и по формуле (3)

Коэффициенты	Вылет, м											
	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Грузоподъемность, т	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	7,6	7,1	6,7	
Коэффициент устойчивости K_y по (2)	3,46	3,08	2,77	2,52	2,30	2,12	1,97	1,83	1,78	1,78	1,74	
Коэффициент устойчивости K_y по (3)	2,00	1,95	1,90	1,85	1,81	1,77	1,73	1,69	1,68	1,68	1,67	

Коэффициенты	Вылет, м											
	19	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
Грузоподъемность, т	6,3	5,8	5,6	5,3	5,1	5,0	4,9	4,8	4,7	4,6	4,5	
Коэффициент устойчивости K_y по (2)	1,76	1,68	1,68	1,66	1,67	1,64	1,60	1,57	1,55	1,52	1,50	
Коэффициент устойчивости K_y по (3)	1,68	1,65	1,65	1,65	1,65	1,64	1,62	1,61	1,60	1,59	1,58

Рис. 7. Коэффициенты грузовой устойчивости башенного крана КБМ-401П при различных положениях грузовой тележки, полученные по нормативной методике и по формуле

Как видно из рис. 7, начиная с вылета $L_B = 15$ м результаты расчета коэффициента устойчивости башенного крана КБМ-401П по нормативной методике и по формуле практически совпадают. Расхождение результатов на вылете от 8 до 15 м объясняется тем, что в методике удерживающий момент считается по формуле

$$M^P = Q_k^H b_k,$$

где Q_k^H — нормативная составляющая веса крана; b_k — расстояние от центра масс крана до вертикальной плоскости, проходящей через ребро опрокидывания, определенное с учетом наклона крана в сторону опрокидывания.

Обе эти величины Q_k^H , b_k и в итоге M^P вычисляются без учета поднимаемого груза и являются константами, хотя на самом деле величина M^P уменьшается по мере увеличения вылета, т.е. отдаления груза от ребра опрокидывания. Кроме этого, не учитывается, что вес груза изменяет положение центра масс крана b_k , соответственно изменяет значение удерживающего момента.

ВЫВОДЫ

Результаты, получаемые по формуле (3), в целом соответствуют распределению коэффициента устойчивости, определяемому по нормативной методике РД 22-166-86. Вместе с тем использование формулы (3), по мнению авторов, проще методики РД 22-166-86 и позволяет проводить исследования устойчивости башенных кранов для различных эксплуатационных положений, а также учитывать пиковые нагрузки, возникающие при динамических процессах в момент подъема груза, повороте стрелы, а также пульсации ветра.

В случае дооборудования башенного крана датчиками давления в узлах ходовых колес вычисления по формуле могут быть реализованы на базе программно-аппаратного устройства и использоваться как устройство безопасности для контроля динамической устойчивости башенного крана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Синельщиков А.В., Джалмухамбетов А.И. Прочность башенного крана КБМ-401П при ветровом воздействии // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2017. № 3 (21). С. 30–35.
2. Обыденков В.А. Устойчивость стационарных башенных кранов в условиях ветрового нагружения : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Тула, 2010. 20 с.
3. Редькин А.В., Сорокин П.А. Модернизация системы управления приводами башенного крана с учетом ветрового нагружения // Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып. 12. Ч. 1. С. 238–244.
4. Чан Дык Хиеу. Устойчивость стационарных башенных кранов при действии резких порывов ветра в условиях Вьетнама : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2013. 20 с.
5. Мишин А.В. Метод обеспечения устойчивости башенных кранов при действии случайных ветровых нагрузок : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2014. 21 с.
6. Булатов Б.Л., Синельщиков А.В. Устойчивость башенных кранов при переменных эксплуатационных нагрузках // Вестник АГТУ. Сер.: Технические науки. 2012. № 2 (54). С. 41–44.

Поступила в редакцию 15 сентября 2017 г.

Принята в доработанном виде 12 октября 2017 г.

Одобрена для публикации 24 ноября 2017 г.

О Б АВТОРАХ: Синельщиков Алексей Владимирович — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства, Астраханский государственный архитектурно-строительный университет (АГАСУ), 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, д. 18; laex@bk.ru;

Джалмухамбетов Абай Ибатуллаевич — ассистент кафедры промышленного и гражданского строительства, Астраханский государственный архитектурно-строительный университет (АГАСУ), 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, д. 18; abay02@mail.ru.

REFERENCES

1. Sinel'shchikov A.V., Dzhal mukhambetov A.I. Prochnost' bashennogo kрана KBM-401P pri vetrovom vozdeystvii [Strength of the KBM-401P tower crane under wind influence]. *Inzhenerno-stroitel'nyy vestnik Pri-*

kaspiya [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Sea]. 2017, no. 3 (21), pp. 30–35. (In Russian)

2. Obydenov V.A. *Ustoychivost' statsionarnykh bashennykh kranov v usloviyakh vetrovogo nagruzheniya : avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Stability of stationary tower cranes under wind loading conditions : author's abstract of the thesis of candidate of technical sciences]. Tula, 2010. 20 p. (In Russian)

3. Red'kin A.V., Sorokin P.A. Modernizatsiya sistemy upravleniya privodami bashennogo krana s uchetom vetrovogo nagruzheniya [Modernization of control system of tower crane in view of wind loading and drive tower crane in view of wind loading]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State University. Technical Science]. 2013, issue. 12, part 1, pp. 238–244. (In Russian)

4. Chan Dyk Khieu. *Ustoychivost' statsionarnykh bashennykh kranov pri deystvii rezkikh poryvov vetra v usloviyakh V'etnama : avtoref. dis. ... kand. tekhn. Nauk*

[Stability of stationary tower cranes under the action of sharp gusts of wind in Vietnam : author's abstract of the thesis of candidate of technical sciences]. Moscow, 2013. 20 p. (In Russian)

5. Mishin A.V. *Metod obespecheniya ustoychivosti bashennykh kranov pri deystvii sluchaynykh vetrovykh nagruzok : avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Method of ensuring the stability of tower cranes under the action of random wind loads : author's abstract of the thesis of candidate of technical sciences]. Moscow, 2014. 21 p. (In Russian)

6. Bulatov B.L., Sinel'shchikov A.V. *Ustoychivost' bashennykh kranov pri peremennykh ekspluatatsionnykh nagruzkakh* [Stability of tower cranes with variable operating conditions]. *Vestnik AGTU. Ser.: Tekhnicheskie nauki* [Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Technical Sciences]. 2012, no. 2 (54), pp. 41–44. (In Russian)

Received September 15, 2017.

Adopted in final form on October 12, 2017.

Approved for publication on November 24, 2017.

ABOUT THE AUTHORS: **Sinel'shchikov Aleksey Vladimirovich** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Industrial and Civil Construction, **Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering (ASUACE)**, 18 Tatischeva str., Astrakhan, 414056, Russian Federation, laex@bk.ru;

Dzhalmukhambetov Abay Ibatullaevich — Assistant, Department of Industrial and Civil Construction, **Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering (ASUACE)**, 18 Tatischeva str., Astrakhan, 414056, Russian Federation, abay02@mail.ru.