



УДК 69.055.4

**Шаехов Алмаз Фритович**

конструктор

Email: shaehov1711@mail.ru

**ТГАТ им. Г. Камала**

Адрес организации: 420021, Россия, г. Казань, ул. Татарстан, д. 1

**Коклюгина Людмила Алексеевна**

кандидат технических наук, доцент

Email: the-lusy@mail.ru

**Ибрагимов Руслан Абдирашитович**

кандидат технических наук, доцент

Email: rusmag007@yandex.ru

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

### **Исследование влияния воздушных потоков на безопасность проведения грузоподъемных операций башенным краном**

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* В настоящее время не учитывается влияние ветрового воздействия на монтируемые конструкции. Особенно опасна пульсационная составляющая ветровой нагрузки. Цель данного исследования – совершенствование методов определения опасной зоны работы башенного крана вблизи строящихся объектов в зависимости от силы ветра и высоты монтажного горизонта.

*Результаты.* Основные результаты исследования состоят в определении влияния скорости ветра и его пульсационной составляющей на изменение опасной зоны башенного крана в зависимости от высоты его работы. В качестве монтируемых грузов приняты основные конструкции, используемые на строительной площадке: опалубка, панели, плиты перекрытия. Воздействие ветра оказывает значительное влияние на увеличение опасной зоны работы крана. Данное воздействие увеличивается с увеличением парусности. Получен коэффициент в дополнение к нормативным требованиям по определению опасной зоны работы башенного крана. Рассмотрены основные виды используемых грузов на строительной площадке с высокими показателями парусности и определены расчетным путем их возможные отклонения при проведении строительно-монтажных работ.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что, с целью снижения ветрового давления необходимо предусматривать мероприятия по уменьшению сопротивления поверхности груза и предотвращение его раскачивания.

**Ключевые слова:** стройплощадка, опасная зона, ветровые нагрузки, парусность.

**Для цитирования:** Шаехов А. Ф., Коклюгина Л. А., Ибрагимов Р. А. Исследование влияния воздушных потоков на безопасность проведения грузоподъемных операций башенным краном // Известия КГАСУ. 2021. № 2 (56). С. 67–75. DOI: 10.52409/20731523\_2021\_2\_67.

#### **1. Введение**

Районы крупных городов ограничены наличием свободных площадок под строительство, поэтому возведение многоэтажных зданий в условиях плотной городской застройки является распространенным явлением. Строительная площадка в условиях стесненности – это территория повышенной опасности, поэтому необходимо соблюдать все требования техники безопасности [1]. При организации рабочего места на стройплощадке необходимо установить и обозначить опасные зоны [2]. Под опасной зоной понимается пространство, в котором периодически или постоянно возникают факторы, создающие угрозу жизни и здоровью работающих и имуществу организации [3]. Следовательно, правильное определение опасных зон, в частности опасной зоны работы крана, а также учет непредвиденных обстоятельств – являются важной частью безопасного производства строительно-монтажных работ.

Установлено, что кратковременное действие ветра может дополнительно увеличить опасную зону. Мощный воздушный поток вполне способен напрямую повлиять на расчет определения опасной зоны башенного крана [4].

Известно, что граница опасных зон в местах, над которыми происходит перемещение грузов башенными кранами, принимается от крайней точки горизонтальной проекции наружного наименьшего габарита перемещаемого груза или стены здания с прибавлением наибольшего габаритного размера перемещаемого (падающего) груза и минимального расстояния отлета груза при его падении (СП 49.13330.2010 приложение Г) согласно табл. 1 и графику определения минимального расстояния отлета груза при его падении:

$$R_{\text{оп}} = R_{\text{раб}}^{\text{max}} + L^{\text{max}} + \frac{B}{2} + r, \quad (1)$$

где  $R_{\text{раб}}^{\text{max}}$  – максимальный рабочий вылет стрелы крана;

$L^{\text{max}}$  – наибольший габарит монтируемой конструкции;

$B$  – наименьший габарит монтируемой конструкции;

$r$  – радиус рассеивания груза при его падении с крана.

В работе [5] автор определял влияние ветровой нагрузки на поднимаемый груз в процессе работы легких кранов и струнных подъемников. Учитывая, что у всех легких кранов вылет крюка (у струнных подъемников – консоли) за пределы здания колеблется от 0,6 до 1 м, указанное исследование строилось вокруг того, что груз, отклоняясь от вертикали, не должен задевать или биться о строящееся здание.

В работах [6-7] отмечается, что ветер повышает риск задержки высотного строительства. Также выявлено, что ветер может увеличивать рабочий радиус крана, при этом увеличивается расстояние от центра крана и, следовательно, увеличивается опрокидывающий момент, что приводит к неустойчивости башенного крана [8].

Возникновение опасных динамических ветровых нагрузок не только существует, что подтверждается многолетними наблюдениями, но и имеет тенденцию к их росту [9-10].

Необходимо учитывать воздействие ветровых давлений, а также пульсационную составляющую ветра [11].

Цель данной работы – определение габарита опасной зоны работы крана при проведении строительно-монтажных работ в зависимости от скорости ветра.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- ввести поправочный коэффициент, учитывающий силу ветра в зависимости от высоты подъема груза;

- рассчитать отклонение поднимаемых грузов в зависимости от их парусности и пульсации ветра.

## 2. Материалы и методы

Действие ветра на поднимаемый груз проявляется в виде нагрузки, величина которой зависит от скорости ветра [12]. В зависимости от силы и интенсивности ветра, площади ветровой нагрузки (парусности) и направления ветра радиус опасной зоны увеличится [13-15]. Из рис. 1 видно, что радиус опасной зоны увеличивается на значение  $l$ .

Введем значение  $l$  в формулу определения опасной зоны для грузов с высокой парусностью:

$$R_{\text{оп}} = R_{\text{раб}}^{\text{max}} + L^{\text{max}} + \frac{B}{2} + r + l, \quad (2)$$

где  $l$  – увеличение опасной зоны за счет ветрового давления.

Для наглядности сравним основные материалы и элементы, используемые при строительстве (табл. 1).

Анализируя табл. 1, можно сделать вывод, что некоторые элементы имеют большую площадь и малый вес, а другие, наоборот, большой вес и малую площадь. Необходимо сравнить их отклонения в одинаковых условиях. Для этого составим таблицу, где сравним исследуемые грузы, насколько они отклоняются по вертикали при разных скоростях ветра. При этом все элементы будут иметь нижнюю отметку на одном уровне, то есть общее расстояние от самой нижней точки груза до тележки крана будет одинаковым. Скорости ветра примем 1-10 м/с.

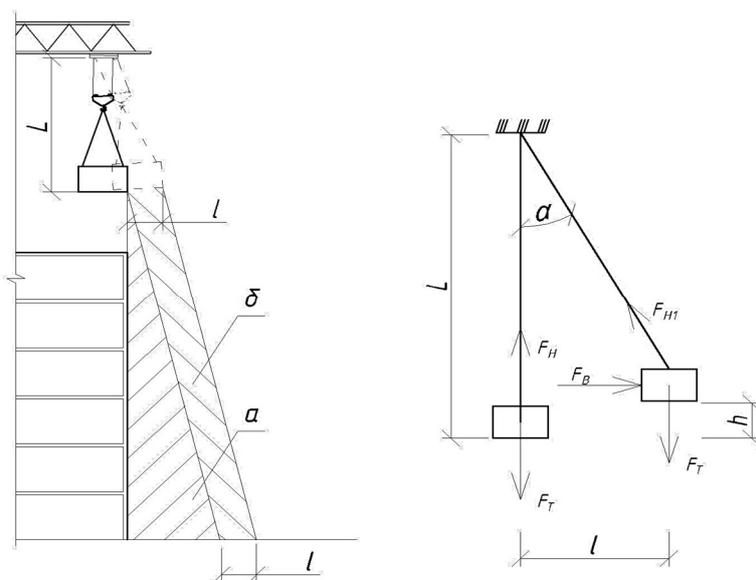


Рис. 1. Воздействие ветровой нагрузки на поднимаемый груз: а – опасная зона возможного падения груза с крана; б – увеличение опасной зоны (иллюстрация авторов)

Таблица 1

**Основные типы грузов**

Наименование	Площадь наветренной стороны, м <sup>2</sup>	Масса, кг	Коэффициент воздушного сопротивления, <i>c</i>
Опалубка МАХИМОМХ (3300×2400 мм)	7,92	408	1,5
Алюминиевая опалубка (1200×3000 мм)	3,6	110	1,5
Стеновая панель В1.3-65.27-12-1	17,28	5150	1,5
Плита перекрытия ПК 30-12-8	0,66	1080	1,5
Бадья Zitrek БН-2.0 021-1067	3,41	330	1

Разберем пример: пусть выполняется подъем груза башенным краном Giraffe ТДК-8.180. Для всех грузов размерность *L* (расстояние от каретки до низа груза) примем 10,3 м.

Известно, что подвешенный груз, будучи в состоянии покоя, находится в вертикальном положении. Под действием горизонтальной силы *F<sub>B</sub>* (в данном случае это полная ветровая нагрузка) груз отклоняется (переместится) от первоначального вертикального положения на некоторый угол *α*. Определим величину отклонения. На подвешенное тело действуют силы собственного веса и сила натяжения нити, при этом *F<sub>T</sub>* = *F<sub>H</sub>*. Допустим, что на груз начинает действовать воздушный поток силой *F<sub>B</sub>* и под его воздействием тело начинает отклоняться и перемещаться на расстояние *l* (рис. 1б).

Отклонения перемещаемого груза. Тангенс угла отклонения зависит от отношения силы ветрового давления к силе тяжести, тогда:

$$tg\alpha = \frac{F_B}{F_T} = \frac{S_w \cdot p}{mg}, \tag{3}$$

где *p* – скоростной напор воздуха.

Отклонение по горизонтали под действием силы *F<sub>B</sub>*, игнорируя изменение по высоте *h* так как оно будет незначительным, можно определить по формуле:

$$l = L \times tg\alpha, \tag{4}$$

После определенных вычислений получим зависимость расстояния отклонения от физических характеристик груза и от воздушного потока:

$$l = \frac{L \times S_w \times v^2 \times \frac{\rho}{2}}{mg}. \tag{5}$$

Отсюда следует, что груз, отклонившись, увеличивает опасную зону башенного крана.

Определяем, каким образом влияют характеристики материала и показатели воздушных потоков. В итоге получается, что в формуле по СП 49.13330.2010 определения опасной зоны появляется дополнительно новый элемент:

$$R_{\text{оп}} = R_{\text{раб}}^{\text{max}} + L^{\text{max}} + \frac{B}{2} + r + \frac{L * S_w * v^2 * \rho}{mg}, \quad (6)$$

где  $L$  – расстояние от низа груза до грузовой тележки;  $S_w$  – парусность поднимаемого груза;  $v$  – скорость ветра;  $\rho$  – плотность воздуха, равная  $1,25 \text{ кг/м}^3$ ;  $m$  – масса поднимаемого груза;  $g$  – ускорение свободного падения, равная  $9,81 \text{ м/с}^2$ .

Учет порыва ветра. Кратковременное действие ветра может дополнительно увеличить опасную зону. Но из-за малого времени действия, порой 20-30 сек., отклонение груза и увеличение опасной зоны необходимо учитывать, как маловероятное явление. Расчет на порыв ветра следует рассматривать как рекомендательный. Учитывая коэффициент увеличения по высоте, скорость порыва ветра на монтажной высоте может намного увеличиться. Расчеты изменения скорости порыва с высотой приведены в табл. 2.

Таблица 2

### Изменение скорости порыва ветра с высотой

Рабочая высота, м	Коэффициент для определения скорости на высоте	Изменение порыва ветра, м/с
10	1,000	13,1
20	1,073	14,0
30	1,119	14,6
40	1,153	15,1
50	1,181	15,4
60	1,204	15,7
70	1,224	16,0
80	1,241	16,2
90	1,257	16,4
100	1,272	16,6
110	1,285	16,8
120	1,297	16,9
130	1,309	17,1
140	1,319	17,2
150	1,329	17,4
160	1,339	17,5
170	1,348	17,6
180	1,356	17,7
190	1,364	17,8
200	1,372	17,9

### 3. Результаты

Проведено сравнение основных грузов, используя данные табл. 1, формулы (5) составлена табл. 3, используя формулу (4). Определен для каждого типа груза свое отклонение  $l$  при разных скоростях ветра и одинаковых условиях.

Из табл. 3 видно, что наибольшее отклонение от вертикали возникает при подъеме алюминиевой щитовой опалубки, что на 41,4 % больше, чем при подъеме щитовой опалубки МАХИМОМХ 15. Наименьшее отклонение от вертикали имеет плита перекрытия. Так, при скорости ветра 10 м/с, отклонение плиты составляет 0,06 м.

Можно сделать вывод, что величина отклонения элементов напрямую зависит в основном от скорости ветра и характеристик поднимаемых грузов, сюда можно отнести вес, наветренную площадь и положение, в котором происходит перемещение. Изменение таких параметров, как длина от низа до крюка и площади поднимаемого элемента, также увеличение коэффициента воздушного сопротивления тела, ведет к прямо пропорциональному увеличению отклонения по вертикали. А при увеличении скорости ветра – к увеличению в квадрате [16-18].

Таблица 3

## Результаты расчета отклонения грузов

Скорость ветра, м/с	Опалубка MAXIMO MX 3300×2400 мм	Алюминиевая опалубка 1200×3000 мм	Стеновая панель В1.3-65.27-12-1	Плита перекрытия ПК 30-12-8	Бадья Zitrek БН-2.0 021-1067
1	0,02	0,03	0,00	0,00	0,01
2	0,08	0,13	0,01	0,00	0,03
3	<u>0,17</u> 58,6 %	<u>0,29</u> 100 %	<u>0,03</u> 10,3 %	<u>0,01</u> 1,9 %	<u>0,06</u> 21,1 %
4	<u>0,31</u> 58,6 %	<u>0,52</u> 100 %	<u>0,05</u> 10,3 %	<u>0,01</u> 1,9 %	<u>0,11</u> 21,1 %
5	<u>0,48</u> 58,6 %	<u>0,81</u> 100 %	<u>0,08</u> 10,3 %	<u>0,02</u> 1,9 %	<u>0,17</u> 21,1 %
6	<u>0,69</u> 58,6 %	<u>1,16</u> 100 %	<u>0,12</u> 10,3 %	<u>0,02</u> 1,9 %	<u>0,24</u> 21,1 %
7	<u>0,94</u> 58,6 %	<u>1,58</u> 100 %	<u>0,16</u> 10,3 %	<u>0,03</u> 1,9 %	<u>0,33</u> 21,1 %
8	<u>1,22</u> 58,6 %	<u>2,06</u> 100 %	<u>0,21</u> 10,3 %	<u>0,04</u> 1,9 %	<u>0,43</u> 21,1 %
9	<u>1,55</u> 58,6 %	<u>2,61</u> 100 %	<u>0,27</u> 10,3 %	<u>0,05</u> 1,9 %	<u>0,55</u> 21,1 %
10	<u>1,91</u> 58,6 %	<u>3,22</u> 100 %	<u>0,33</u> 10,3 %	<u>0,06</u> 1,9 %	<u>0,68</u> 21,1 %

Следовательно, необходимо уделять особое внимание скорости воздушного потока на строительной площадке во время производства с парусными и крупногабаритными грузами.

На основе вышеприведенных формул (5), (6) составлена табл. 4, в которой учитываются динамические воздействия, возникающие при работе башенного крана, и давление порыва ветра. Рассмотрены наиболее подверженные отклонению груза – крупнощитовые опалубки. Расчеты определены с учетом того, что максимальный рабочий вылет составляет 30 м.

Таблица 4

## Результаты расчета отклонения (м)

Рабочая высота, м	Скорость порыва ветра, м/с	Опалубка MAXIMO MX 3300×2400 мм	Алюминиевая опалубка 1200×3000 мм
10	13,1	<u>3,23</u> 59,3 %	<u>5,53</u> 100 %
20	14,0	<u>3,75</u> 59,3 %	<u>6,31</u> 100 %
40	15,1	<u>4,36</u> 59,3 %	<u>7,35</u> 100 %
60	15,7	<u>4,71</u> 59,3 %	<u>7,94</u> 100 %
80	16,2	<u>5,01</u> 59,3 %	<u>8,45</u> 100 %
100	16,6	<u>5,27</u> 59,3 %	<u>8,88</u> 100 %
120	16,9	<u>5,46</u> 59,3 %	<u>9,20</u> 100 %
140	17,2	<u>5,65</u> 59,3 %	<u>9,53</u> 100 %
160	17,5	<u>5,85</u> 59,3 %	<u>9,87</u> 100 %
180	17,7	<u>5,99</u> 59,3 %	<u>10,09</u> 100 %
200	17,9	<u>6,12</u> 59,3 %	<u>10,32</u> 100 %

По результатам расчета видно, что отклонения от пульсационного воздействия ветра намного больше, чем при обычном (стационарном) воздушном потоке. Необходимо такое явление предусматривать заранее и предупреждать возможные последствия при падении груза с крюка крана.

#### 4. Обсуждение

Исследование показало, что порывы ветра усиливаются в зависимости от района строительства, например, если процесс строительства проходит внутри или рядом с плотно застроенной территорией города, то существующие здания разрушают гладкий поток, который ветер достиг бы на открытой местности, и создаются турбулентные потоки. Именно эти потоки могут негативно сказаться на подвешенный груз на крюке и привести к увеличению рабочего радиуса башенного крана. А увеличение рабочего радиуса влечет за собой и увеличение опасной зоны башенного крана. Поэтому необходимо уделять особое внимание этому фактору при размещении башенного крана на строительной площадке, планировании подъема и перемещения грузов с высоким значением парусности.

Величина отклонения в основном зависит от параметров груза, и это необходимо учитывать при расчете опасной зоны в целях повышения безопасности выполнения строительно-монтажных работ. Получены зависимости, рекомендуемые для определения увеличения опасной зоны работы башенного крана, от скорости ветра. Также рассмотрены основные используемые грузы с высокими показателями парусности и определены теоретическим путем их возможные отклонения при проведении строительно-монтажных работ. Рассмотрено такое явление как порыв ветра и рассчитаны возможные отклонения при его воздействии на подвешенный груз.

Ветровая нагрузка является опасным фактором, который необходимо учитывать, как фактор влияния на увеличение радиуса работы крана и, в первую очередь, опасной зоны. Очень важно принимать во внимание скорость ветра на этапе проектирования строительного генерального плана.

#### 5. Заключение

1. Воздействие ветра оказывает значительное влияние на увеличение опасной зоны работы крана. Данное воздействие увеличивается с увеличением парусности. С целью снижения ветрового давления необходимо предусматривать мероприятия по уменьшению сопротивления поверхности груза и предотвращение его раскачивания.

2. Получен коэффициент  $(\frac{L \times S_w \times v^2 \times \rho}{2mg})$  в дополнение к нормативным требованиям по определению опасной зоны работы башенного крана. Рассмотрены основные виды используемых грузов на строительной площадке с высокими показателями парусности и определены расчетным путем их возможные отклонения при проведении строительно-монтажных работ.

#### Список библиографических ссылок

1. Shakhiev A. D., Evlakhova E. Yu. Features of the placement and operation of tower cranes during the construction of multi-storey buildings in dense urban areas, in Science and innovation – modern concepts. Collection of scientific articles on the results of the work of the International Scientific Forum, Moscow, 2019. P. 19–28
2. Sadeghi S., Soltanmohammadlou N., Rahnamayiezekavat P. A systematic review of scholarly works addressing crane safety requirements // Safety Science. 2021. № 133. P. 105002. DOI: 10.1016/j.ssci.2020.105002.
3. Tzu-Sung Wu. Anti-sway tracking control of tower cranes with delayed uncertainty using a robust adaptive fuzzy control // Fuzzy Sets and Systems. № 290. 2016. P. 118–137. DOI: 10.1016/j.fss.2015.01.010.
4. Zhou W., Zhao T., Liu W., Tang J. Tower crane safety on construction sites: A complex sociotechnical system perspective // Safety Science. 2018. № 109. P. 95–108. DOI: 10.1016/j.ssci.2018.05.001.

5. Чаньшев Р. О. Подъемники и легкие краны в строительстве. М. : Стройиздат, 1975. 288 с.
6. Skelton I., Demian P., Glass J., Bouchlaghem D., Anumba C. Lifting Wing in Constructing Tall Buildings – Aerodynamic Testing. Buildings. 2014. № 4 (2). P. 245–265. DOI: 10.3390/buildings4020245.
7. Raviv G., Shapira A., Fishbain B. AHP-based analysis of the risk potential of safety incidents: Case study of cranes in the construction industry. Safety Science. 2017. № 91. P. 298–309. DOI: 10.1016/j.ssci.2016.08.027.
8. Paul Swuste. A «normal accident» with a tower crane? An accident analysis conducted by the Dutch Safety Board // Safety Science. № 57. 2013. P. 276–282
9. Das S., Dhalmahapatra K., Maiti J. Z-number integrated weighted VIKOR technique for hazard prioritization and its application in virtual prototype based EOT crane operations // Applied Soft Computing Journal. 2020. № 94. P. 106419. DOI: 10.1016/j.asoc.2020.106419.
10. Lesovik V., Voronov V., Glagolev E., Fediuk R., Alaskhanov A., Amran Y. H. M., Murali G., Baranov A. Improving the behaviors of foam concrete through the use of composite binder // Journal of Building Engineering. 2020. № 31. P. 101414. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101414.
11. Зорина М. А. Особенности проектирования стройгенпланов в условиях плотной городской застройки : сб. статей «традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство». Самара, 2015. С. 217–413.
12. Xiaodong L., Wanshui H., Yangguang Y., Xiao Ch., Qing X. Corrosion fatigue assessment and reliability analysis of short suspender of suspension bridge depending on refined traffic and wind load condition // Engineering Structures. № 234. 2021. P. 111950. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.111950.
13. Zhonghui W., Yumi I., Yasushi U. The flow fields generated by stationary and travelling downbursts and resultant wind load effects on transmission line structural system // Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics. № 210. 2021. P. 104521. DOI: 10.1016/j.jweia.2021.104521.
14. Zhengru R., Amrit Sh., Behfar A., Karl H., Hans P. Model-free anti-swing control of complex-shaped payload with offshore floating cranes and a large number of lift wires. Ocean Engineering. № 228. 2021. P. 108868. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.108868.
15. Bogdanov R., Mavlyuberdinov A. Development of the composition of the self-compacting concrete with high performance // IOP conference series: Materials Science and Engineering. 2020. № 890. P. 012132.
16. Ruwan Rajapakse. Chapter 5: Construction Equipment. Construction Engineering Design Calculations and Rules of Thumb. 2016. P. 99–137.
17. Jiahui Ye, Jie Huang. Analytical analysis and oscillation control of payload twisting dynamics in a tower crane carrying a slender payload // Mechanical Systems and Signal Processing. 2021. № 158. P. 107763. DOI: 10.1016/j.ymssp.2021.107763.
18. Khuziakhmetov R., Nurieva D. Determination of the main technical reasons for the fall of pile driving machine near the slope of the foundation pit // IOP conference series: Materials Science and Engineering. 2020. № 890. P. 012136.

**Shaehov Almaz Fritovich**

constructor

Email: shaehov1711@mail.ru

**TGAT them. G. Kamala**

The organization address: 420021, Russia, Kazan, Tatarstan st., 1

**Koklyugina Lyudmila Alekseevna**

candidate of technical sciences, associate professor

Email: the-lusy@mail.ru

**Ibragimov Ruslan Abdirashitovich**

candidate of technical sciences, associate professor

Email: rusmag007@yandex.ru

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

## Study of the influence of air flows on the safety of carrying out lifting operations by a tower crane

### Abstract

*Problem statement.* At present, the effect of wind action on the structures being mounted is not taken into account. The pulsating component of the wind load is especially dangerous. The purpose of this study is to improve the methods for determining the dangerous zone of the tower crane operation near the facilities under construction, depending on the wind strength and the height of the mounting horizon.

*Results.* The main results of the study are to determine the effect of wind speed, the pulsating component of the wind on the change in the danger zone of a tower crane, depending on the height of its work. The main structures used at the construction site are taken as the mounted loads: formwork, panels, floor slabs.

*Conclusions.* The impact of the wind has a significant effect on the increase in the hazardous area of the crane operation. This impact increases with increasing windage. In order to reduce wind pressure, it is necessary to provide for measures to reduce the resistance of the surface of the load and prevent it from swinging. The coefficient was obtained in addition to the regulatory requirements for determining the hazardous area of the tower crane operation. The main types of cargo used at the construction site with high windage parameters are considered and their possible deviations during construction and installation work are determined by calculation.

**Keywords:** construction site, danger zone, wind loads, windage.

**For citation:** Shaehov A. F., Koklyugina L. A., Ibragimov R. A. Study of the influence of air flows on the safety of carrying out lifting operations by a tower crane // *Izvestija KGASU*. 2021. № 2 (56). P. 67–75. DOI: 10.52409/20731523\_2021\_2\_67.

### References

1. Shakhiev A. D., Evlakhova E. Yu. Features of the placement and operation of tower cranes during the construction of multi-storey buildings in dense urban areas, in *Science and innovation – modern concepts. Collection of scientific articles on the results of the work of the International Scientific Forum, Moscow, 2019*. P. 19–28
2. Sadeghi S., Soltanmohammadlou N., Rahnamayiezekavat P. A systematic review of scholarly works addressing crane safety requirements // *SafetyScience*. 2021. № 133. P. 105002. DOI: 10.1016/j.ssci.2020.105002.
3. Tzu-Sung Wu. Anti-sway tracking control of tower cranes with delayed uncertainty using a robust adaptive fuzzy control // *Fuzzy Sets and Systems*. 2016. № 290. P. 118–137. DOI: 10.1016/j.fss.2015.01.010.
4. Zhou W., Zhao T., Liu W., Tang J. Tower crane safety on construction sites: A complex sociotechnical system perspective // *Safety Science*. 2018. № 109. P. 95–108. DOI: 10.1016/j.ssci.2018.05.001.
5. Chanyshv R. O. Hoists and lightweight cranes in construction. M. : Stroyizdat, 1975. 288 p.
6. Skelton I., Demian P., Glass J., Bouchlaghem D., Anumba C. Lifting Wing in Constructing Tall Buildings – Aerodynamic Testing // *Buildings*. 2014. № 4 (2). P. 245–265. DOI: 10.3390/buildings4020245.
7. Raviv G., Shapira A., Fishbain B. AHP-based analysis of the risk potential of safety incidents: Case study of cranes in the construction industry. *Safety Science*. 2017. № 91. P. 298–309. DOI: 10.1016/j.ssci.2016.08.027.
8. Paul Swuste. A «normal accident» with a tower crane? An accident analysis conducted by the Dutch Safety Board // *Safety Science*. 2013. № 57. P. 276–282
9. Das, S., Dhalmahapatra, K., Maiti, J. Z-number integrated weighted VIKOR technique for hazard prioritization and its application in virtual prototype based EOT crane

- operations // *Applied Soft Computing Journal*. 2020. № 94. P. 106419. DOI: 10.1016/j.asoc.2020.106419.
10. Lesovik V., Voronov V., Glagolev E., Fediuk R., Alaskhanov A., Amran Y. H. M., Murali G., Baranov A. Improving the behaviors of foam concrete through the use of composite binder // *Journal of Building Engineering*. 2020. № 31. P. 101414. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101414.
  11. Zorina M. A. Features of the design of construction plans in a dense urban development. Collection of articles «traditions and innovations in construction and architecture. Building». Samara. 2015. P. 2017–413.
  12. Xiaodong L., Wanshui H., Yangguang Y., Xiao Ch., Qing X. Corrosion fatigue assessment and reliability analysis of short suspender of suspension bridge depending on refined traffic and wind load condition // *Engineering Structures*. 2021. № 234. P. 111950. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.111950.
  13. Zhonghui W., Yumi I., Yasushi U. The flow fields generated by stationary and travelling downbursts and resultant wind load effects on transmission line structural system // *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*. 2021. № 210. P. 104521. DOI: 10.1016/j.jweia.2021.104521.
  14. Zhengru R., Amrit Sh., Behfar A., Karl H., Hans P. Model-free anti-swing control of complex-shaped payload with offshore floating cranes and a large number of lift wires. *Ocean Engineering*. 2021. № 228. P. 108868. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.108868.
  15. Bogdanov R., Mavlyuberdinov A. Development of the composition of the self-compacting concrete with high performance // *IOP conference series: Materials Science and Engineering*. 2020. № 890. P. 012132.
  16. Ruwan Rajapakse. Chapter 5: Construction Equipment. *Construction Engineering Design Calculations and Rules of Thumb*. 2016. P. 99–137
  17. Jiahui Ye, Jie Huang. Analytical analysis and oscillation control of payload twisting dynamics in a tower crane carrying a slender payload // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2021. № 158. P. 107763. DOI: 10.1016/j.ymsp.2021.107763.
  18. Khuziakmetov R., Nurieva D. Determination of the main technical reasons for the fall of pile driving machine near the slope of the foundation pit // *IOP conference series: Materials Science and Engineering*. 2020. № 890. P. 012136.