

УДК 621.873

Е. М. Арефьев, канд. техн. наук., доцент, **С. А. Матвиенко**, канд. техн. наук.
Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР
Тел. +38 (071)-3678009, E-mail: serge-matvienko@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БАШЕННОГО КРАНА НА СРЕДНЕВЗВЕШЕННУЮ ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ЦИКЛА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ГРУЗА

В статье установлена функция длительности цикла башенного крана; разработан алгоритм расчета средневзвешенной длительности цикла перемещения груза; представлены результаты исследования влияния скорости подъема, скорости передвижения и скорости поворота башенного крана на средневзвешенную длительность цикла перемещения груза.

Ключевые слова: цикл, средневзвешенная длительность, функция, алгоритм, скорость подъема, скорость передвижения, башенный кран

E. M. Arefev, S. A. Matvienko

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE MAIN TECHNICAL CHARACTERISTICS OF A TOWER CRANE ON THE WEIGHTED AVERAGE DURATION OF THE CARGO MOVEMENT CYCLE

The article has a function of cycle time tower crane; the algorithm of calculation of the weighted average duration of the displacement cycle of the goods; presents the results of a study the effects of lifting speed, travel speed and speed of rotation of the tower crane on the weighted average duration of the cycle of movement of cargo.

Keywords: cycle, weighted average duration, function, algorithm, lifting speed, movement speed, tower crane

Введение. Башенный кран является одним из ключевых компонентов в большинстве современных строительных проектов. Выбор типа и расположения башенных кранов, используемых при строительстве зданий, является важным вопросом при планировании строительных работ. Работа башенного крана имеет циклический характер. Важным фактором является число циклов за единицу общего времени. Цикличность оказывает определяющее значение не только на производительность, но и на долговечность крана. Максимальная производительность башенного крана достигается при минимальной продолжительности цикла выполнения операции $T_{ц}$. Поэтому оптимизация этого параметра является важной научной и практической задачей [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8].

Цель исследования. Исследование влияния основных технических характеристик башенного крана на средневзвешенную длительность цикла перемещения груза и выявление наиболее эффективного пути её снижения.

Материалы и результаты исследований. При перемещении груза башенный кран выполняет следующую последовательность операций: подъем перемещаемого груза, поворот башни на 180° , перемещение к месту спуска груза, окончательное регулирование координаты спуска груза с помощью передвижения грузовой тележки вдоль стрелы, спуск груза.

При этом в зависимости положения начальной и конечной точек в рабочей области, некоторые операции могут не выполняться. На рис. 1 изображена схема перемещения груза башенным краном при расположении начальной и конечной точек размещения груза в различных координатных плоскостях. При такой схеме перемещения груза, кран выполняет последовательность операций, перечисленных выше. Во втором случае, когда груз перемещается в пределах одной координатной плоскости, операция поворота башни крана не выполняется (рис. 2).

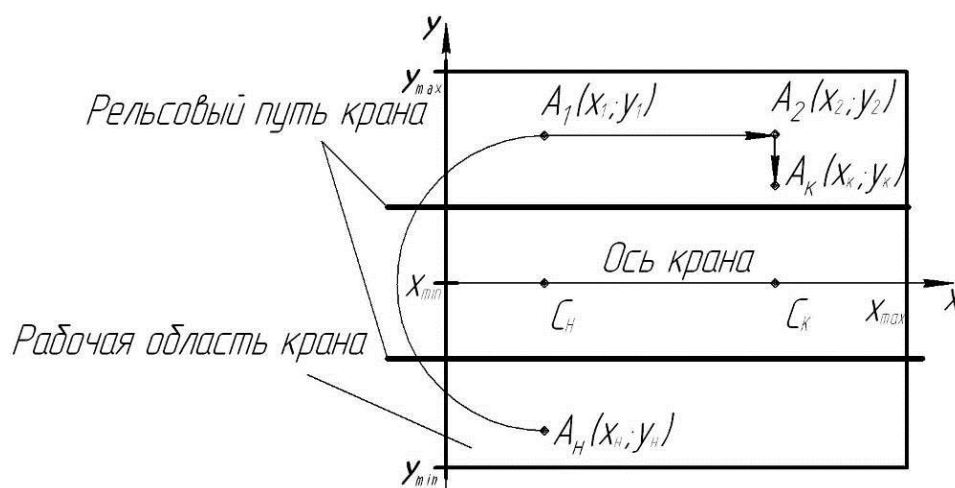


Рисунок 1. Схема перемещения груза башенным краном из одной координатной плоскости в другую

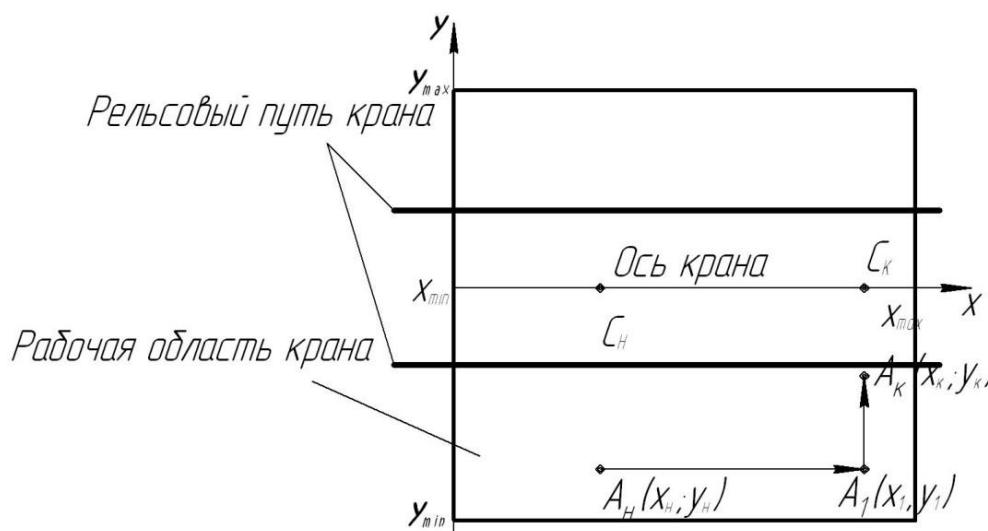


Рисунок 2. Схема перемещения груза башенным краном в пределах одной координатной плоскости: A_H, A_K – точка с координатами начала подъема груза и разгрузки соответственно; $A_{1,2}$ – промежуточная координата перемещения груза; C_H – точка центра вращения башни крана вначале подъема груза; C_K – точка центра вращения башни крана при спуске груза; $x_{min}, x_{max}, y_{min}, y_{max}$ – координаты, задающие рабочую область крана

Длительность цикла перемещения груза башенным краном можно разделить на три этапа: длительность подъема груза ($T_{под}$), длительность поворота ($T_{пов}$), длительность перемещения крана ($T_{дв}$).

Тогда полное время цикла перемещения краном груза будет равно:

$$T_{под} = T_{под} + T_{пов} + T_{дв},$$

$$T_{под} = \frac{h_{под}}{v_{под}}, \quad T_{пов} = \frac{\varphi}{\omega_{пов}}, \quad T_{дв} = \frac{l_{кр}}{v_{пер}} + \frac{l_{мел}}{v_{мел}}, \quad (1)$$

где: φ – угол поворота крана ($\varphi = 180$ град); $\omega_{пов}$ - скорость поворота башни крана, об/мин; $v_{пер}$ - скорость перемещения башенного крана, м/мин; $v_{мел}$ - скорость перемещения грузовой тележки крана, м/мин; $v_{под}$ - скорость подъема башенного крана, м/мин; $h_{под}$ – высота подъема груза; $l_{кр}$, $l_{мел}$ - путь, проходимый соответственно грузом при передвижении крана и перемещении тележки, который можно выразить как:

$$l_{кр} = |x_k - x_n|;$$

$$l_{мел} = |y_k + y_n| \text{ - при схеме перемещения груза башенным краном из одной координатной плоскости в другую;}$$

$$l_{мел} = |y_k - y_n| \text{ - при схеме перемещения груза башенным краном в пределах одной координатной плоскости.}$$

Тогда получим:

при $y_n < 0$ и $y_k > 0$ или $y_n > 0$ и $y_k < 0$:

$$T(x_n, x_k, y_n, y_k) = \frac{\varphi}{\omega_{пов}} + \frac{|x_k - x_n|}{v_{пер}} + \frac{|y_n + y_k|}{v_{мел}} + 2 \frac{h_{под}}{v_{под}}, \quad (2)$$

при $y_n > 0$ и $y_k > 0$ или $y_n < 0$ и $y_k < 0$:

$$T(x_n, x_k, y_n, y_k) = \frac{|x_k - x_n|}{v_{пер}} + \frac{|y_k - y_n|}{v_{мел}} + 2 \frac{h_{под}}{v_{под}}, \quad (3)$$

где y_n, x_n (y_k, x_k) - начальные (конечные) координаты груза при его перемещении.

Очевидно, что T – функция 4-х случайных величин x_n, y_n, x_k, y_k . Математическое ожидание этой функции определяется по зависимости [5]:

$$T_{CB} = \int_{x_{min}}^{x_{max}} \int_{y_{min}}^{y_{max}} \int_{x_{min}}^{x_{max}} \int_{y_{min}}^{y_{max}} T(x_n, y_n, x_k, y_k) \cdot f(x_n, y_n) \cdot f(x_k, y_k) dy_k dx_k dy_n dx_n, \quad (4)$$

Где $x_{min}, x_{max}, y_{min}, y_{max}$ – предельные значения координат задающих рабочую зону башенного крана.

Вычисление функции средневзвешенного значения длительности цикла в заданном виде в математическом редакторе *MathCad* связано с большим количеством операций и приводит к зависанию системы. Поэтому перейдем от интеграла к сумме. При этом рабочая зона делится на конечные площадки прямоугольной формы (площадки разбиения).

$$T_{ca} = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N \sum_{k=0}^N \sum_{l=0}^N T(x_i, y_j, x_k, y_l) F_{ij} F_{kl}, \quad (5)$$

где N – число точек, на которые разбиваются оси координат с равномерным шагом;
 $x_i, y_j, x_k, y_l - i, j, k, l$ -ая координата перемещения груза в рабочей зоне крана;
 F – вероятность попадания точки в заданный квадрат разбиения.

$$F = f(x, y) \cdot \Delta x \cdot \Delta y$$

$$\Delta x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{N}, \Delta y = \frac{y_{\max} - y_{\min}}{N}, \quad (6)$$

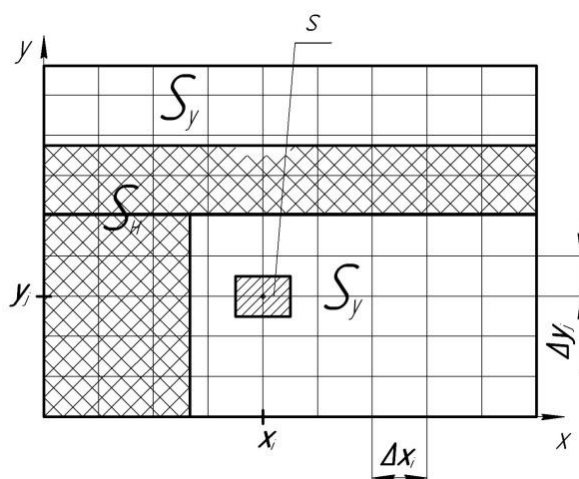


Рисунок 3. Схема разбиения рабочей зоны башенного крана

Алгоритм расчета средневзвешенной длительности цикла перемещения груза. Ввод исходных данных:

- скорость перемещения башенного крана, м/мин;
- скорость перемещения грузовой тележки крана, м/мин;
- скорость поворота башни крана, об/мин;
- угол поворота крана ($\varphi = 180$ град);
- скорость подъема башенного крана, м/мин;
- предельные значения координат задающих рабочую зону башенного крана.

Задаём число точек, на которые разбиваются оси координат.

Рассчитываем:

- величину скорости поворота башни крана в рад/с;
- площадь рабочей зоны крана;
- площадь рабочей зоны крана, по которой не перемещается груз;
- значение координаты каждой точки, которые разбивают оси координат;
- функцию распределения координат точки перемещения груза башенным краном в пределах его рабочего участка (плотность вероятности);
- вероятность попадания точки в заданный квадрат разбиения;
- функцию длительности цикла, которая зависит от начальных и конечных координат расположения перемещаемого краном груза;
- средневзвешенную длительность цикла перемещения груза.

Выводим результат.

Определение количества точек разбиения рабочей зоны крана. Изменяя число точек (p), на которые разбиваются оси координат с определенным интервалом рас-

считываем средневзвешенную длительность цикла для каждого значения этих точек. Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Расчетные значения средневзвешенной длительности цикла при различных значениях точек, на которые разбиваются оси координат.

p	$T_{св}$	$\Delta, \%$	p	$T_{св}$	$\Delta, \%$
1	16,51	611,64	16	2,53	9,05
2	7,38	218,10	17	2,31	0,43
3	4,46	92,24	18	2,44	5,17
4	3,96	70,69	19	2,46	6,03
5	3,19	37,50	20	2,37	2,16
6	3,12	34,48	21	2,51	8,19
7	3,08	32,76	22	2,34	0,86
8	2,75	18,53	23	2,43	4,74
9	2,76	18,97	24	2,29	1,29
10	2,54	9,48	25	2,39	3,02
11	2,8	20,69	26	2,4	3,45
12	2,45	5,60	27	2,34	0,86
13	2,63	13,36	28	2,36	1,72
14	2,64	13,79	29	2,24	3,45
15	2,51	8,19	30	2,32	0,00

Погрешность расчета средневзвешенной длительности цикла для текущего значения количества точек p , на которые разбиваются оси координат ($T_{св p}$) относительно средневзвешенной длительности цикла при $p=30$:

$$\Delta = \frac{|T_{св p} - T_{св 30}|}{T_{св 30}}, \% \quad (7)$$

Графическая зависимость расчетной средневзвешенной длительности цикла от количества точек разбиения рабочей зоны представлена на рис. 4.

Анализируя полученные результаты вычислений приходим к выводу, что достаточная точность расчета достигается при разбиении рабочей зоны на 22 точки.

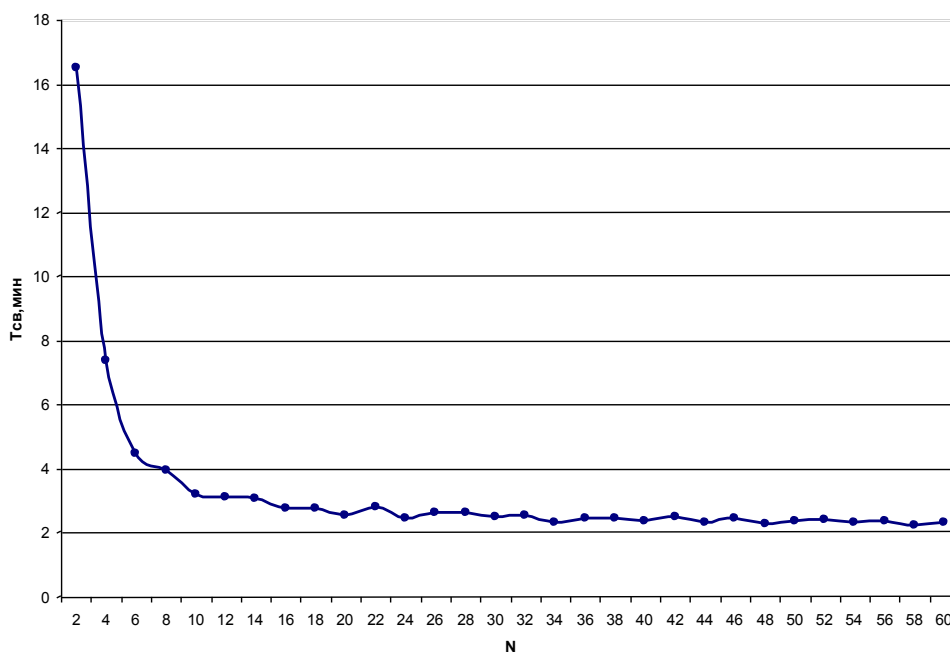


Рисунок 4. Зависимость расчетной средневзвешенной длительности цикла от количества точек разбиения рабочей зоны

График зависимости средневзвешенной длительности цикла перемещения груза башенным краном при изменении скорости подъема представлен на рис. 5. Скорость задавалась в соответствии с формулой:

$$v' = K_{изм} v_{под}, \tag{8}$$

где v' – измененная скорость подъема крана;
 $K_{изм}$ – коэффициент изменения, %

Таблица 2. Влияния скорости подъема башенного крана на средневзвешенную длительность цикла перемещения груза

Коэффициент изменения скорости, %	25	50	75	100
Значение скорости подъема, м/мин	40	48	56	64
Средневзвешенная длительность цикла перемещения, груза мин	2,21	2,16	2,11	2,08
Значение изменения средневзвешенной длительности цикла перемещения, %	4	6	9	10

Аналогично строим график зависимости средневзвешенной длительности цикла перемещения груза башенным краном от скорости передвижения крана (рис. 6).

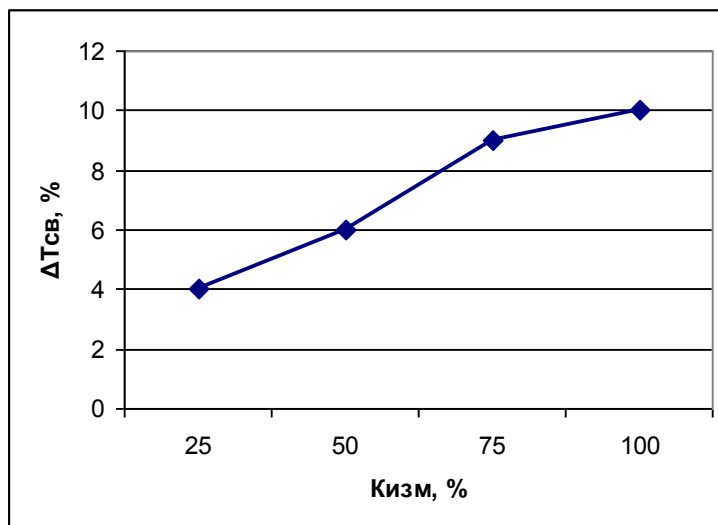


Рисунок 5. График зависимости изменения расчетной средневзвешенной длительности цикла от скорости подъема башенного крана

Таблица 3. Влияние скорости перемещения башенного крана на средневзвешенную длительность цикла перемещения груза

Коэффициент изменения скорости, %	25	50	75	100
Значение скорости передвижения, м/мин	36,6	44	51,3	58,6
Средневзвешенная длительность цикла перемещения груза, мин	2,13	2	1,92	1,85
Значение изменения средневзвешенной длительности цикла перемещения, %	8	13	17	20

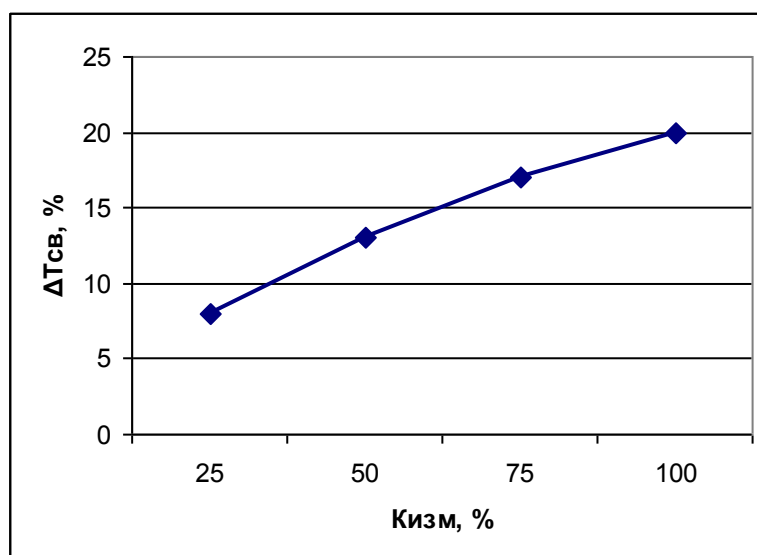


Рисунок 6. График изменения зависимости расчетной средневзвешенной длительности цикла от скорости перемещения башенного крана

Результаты исследования влияния скорости передвижения грузовой тележки башенного крана на средневзвешенную длительность цикла перемещения груза представлены в табл. 4 и на рис. 7.

Таблица 4. Влияния скорости перемещения грузовой тележки башенного крана на средневзвешенную длительность цикла перемещения груза.

Коэффициент изменения скорости, %	25	50	75	100
Значение скорости передвижения тележки, м/мин	34,9	41,9	48,8	55,8
Средневзвешенная длительность цикла Перемещения груза, мин	2,21	2,15	2,11	2,08
Значение изменения средневзвешенной длительности цикла перемещения, %	4	7	9	10

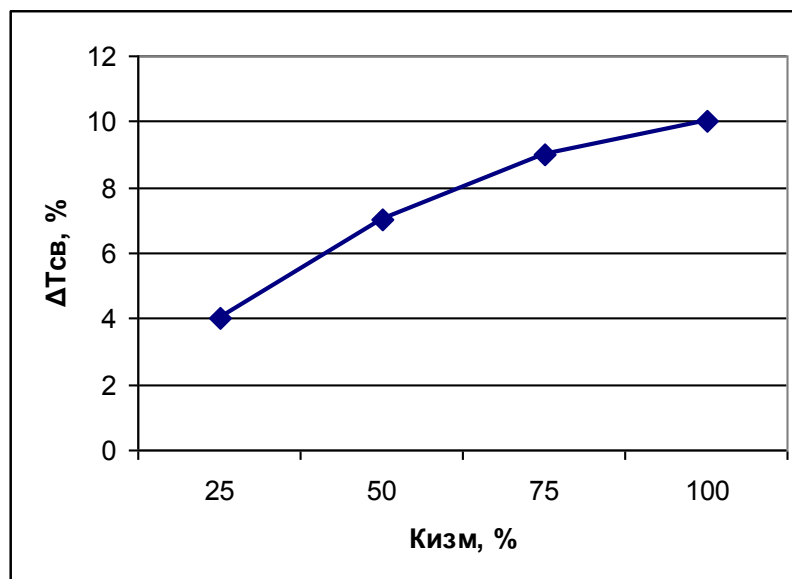


Рисунок 7. График зависимости изменения расчетной средневзвешенной длительности цикла от скорости перемещения грузовой тележки башенного крана

Результаты исследования влияния скорости поворота башенного крана на средневзвешенную длительность цикла перемещения груза представлены в табл. 5 и на рис. 8.

Таблица 5. Влияния скорости поворота башенного крана на средневзвешенную длительность цикла перемещения груза

Коэффициент изменения скорости, %	25	50	75	100
Значение скорости поворота башенного крана, м/мин	1,08	1,29	1,51	1,72
Средневзвешенная длительность цикла перемещения груза, мин	2,21	2,15	2,1	2,07
Значение изменения средневзвешенной длительности цикла перемещения, %	4	7	9	10

Выводы. Достаточная точность расчета средневзвешенной длительности цикла башенного крана достигается при разбивании рабочей зоны на 22 точки. При увеличении скоростей перемещения грузовой тележки, передвижения башенного крана и поворота башенного крана, также увеличивается и средневзвешенная длительность цикла, но в меньшем % соотношении.

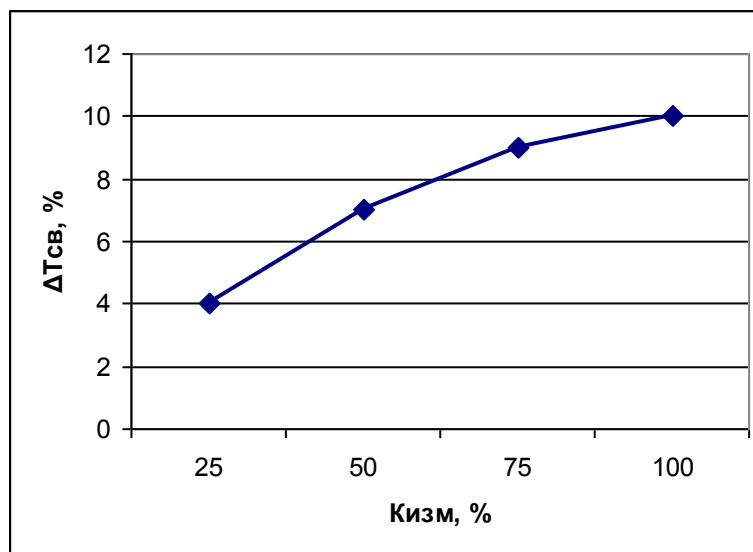


Рисунок 8. График зависимости изменения расчетной средневзвешенной длительности цикла от скорости поворота башенного крана

ЛИТЕРАТУРА:

1. Анисимова, Д. Ю. Метод повышения производительности башенного крана в гражданском строительстве / Д. Ю. Анисимова, В. В. Ильина // Вестник науки. – 2020. – № 1 (22). – Т.3. – С. 127-130.
2. Малев, А. А. Оптимизация подбора башенного крана путем построения номограммы производительности / А. А. Малев. // Молодой ученый. - 2019. – № 21 (259). – С. 143-146. – URL: <https://moluch.ru/archive/259/59623/>.
3. Abdelmegid, M. A. GA optimization model for solving tower crane location problem in construction sites / M. A. Abdelmegid et al. // Alexandria Eng. J. (2015). – <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2015.05.011>.
4. Shapira, A. Tower crane cycle times: Case study of remote-control versus cab-control operation / A. Shapira, A. Elbaz // Journal of Construction Engineering and Management. – 2014. – № 140(12). – S. 307-318.
5. Abdel-Khalek, H. A Computer-based Model for Optimizing the Location of Single Tower Crane in Construction Sites / H. Abdel-Khalek, K. Shawki, M. Adel // International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT). – 2013. – Т.2 №2. – S. 438-446.
6. Marzouk, M. Decision support for tower crane selection with building information models and genetic algorithms / M. Marzouk, A. Abubakr // Autom. Constr. – 2016. – № 61. – S. 1–15.
7. Shapira, A. Characteristics of Equipment Planning for Multi-Crane Building Construction Sites / A. Shapira, A. Ben-David // Buildings. – 2017. – №7(3). – <https://doi.org/10.3390/buildings7030081>.
8. Ji, Y. Automated tower crane planning: Leveraging 4-dimensional BIM and rule-based checking / Y. Ji, F. Leite // Autom. Constr. – 2018. – №93. – S. 78 - 90.

Поступила в редколлегию 18.03.2020 г.