

## МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВА ГОРИЗОНТИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ПРИ РАБОТЕ НА СЛАБОНЕСУЩИХ ГРУНТАХ

DOI: 10.18572/2686-8598-2019-2-2-5-13

**Сладкова Л.А, Григорьев П.А.**

*Российский университет транспорта*

*125432, Россия, ул. Образцова, дом 9*

*rich.cat2012@yandex.ru 8(965) 377 93 89; grigorievpavel1996@yandex.ru, 8 (985) 140 02*

**Аннотация:** Аналитическое исследование работы транспортных средств на примере самоходных кранов, позволило выявить физическую картину изменения усилий под опорами. На основании полученной модели определены условия обеспечения горизонтирования поверхностей транспортных средств при работе на слабонесущих грунтах. Аналитически установлено, что применение усовершенствования конструкции, заключающееся в расположении сплошного основания под опорами, позволит увеличить устойчивую работу конструкции почти в два раза. На основании этого положения предложено устройство обеспечения горизонтирования поверхности на слабонесущих грунтах.

**Ключевые слова:** моделирование, горизонтирование, слабонесущие грунты, транспортное средство, устройство.

## LEVELING DEVICE MODELING SURFACE VEHICLES WHEN RUNNING ON SOFT SOILS

**Sladkova L.A, Grigoriev P.A.**

*Russian University of transport.*

*125432, Russia, St. Obratsova, House 9*

*rich.cat2012@yandex.ru*

**Abstract:** an analytical study of work vehicles on the example of mobile cranes, revealed physical picture of changes in efforts under the legs. Based on the received model defined conditions for leveling surfaces of vehicles when running on soft soils. Analytically, it is established that the application of improvements to the design of the location of the solid foundation supports, would increase the steady construction job nearly doubled. Based on this provision suggested that the device ensure leveling surface on soft soils.

**Key words:** modeling, leveling slabonesushhie primers, vehicle, device.

## ВВЕДЕНИЕ

Известные грузоподъемные средства (самоходные краны) имеют ограниченные возможности в результате недостаточного горизонтирования поверхности из-за проседания в грунт выносных опор при работе на слабонесущих грунтах (Arnold, V.I. & Vogtmann, K., 1989; Becker R., 2001; Kim H.H. & Lee, K., 2007). При работе на слабонесущих грунтах из-за просадки аутригеров, причиной которой является неравномерность распределения усилий под опорами, возможен перекос рамы с расположенной на ней поворотной платформой, что нарушает работу стрелового крана и ведет к нарушению его безопасной эксплуатации и потере устойчивости (Krastanov K., 2017). Известно, что одним из основных способов снижения опрокидывающего момента является расширение опорного контура машины. Эта задача решается путем размещения под выносными опорами щитов. Данный способ отличается низкой культурой производства и снижает производительность. При этом в процессе эксплуатации при проведении погрузочно-разгрузочных работ просадка опор меняется во времени, что требует постоянной регулировки горизонтирования системы за счет установки дополнительных следящих систем. Это ведет к значительному усложнению всей системы. (Tabachkov A.V. Aleksandrov M.P. et. al., 1986; Duerr D., 2015; Headley J., 2014; International standard ISO 4310(E), 2006; Tamate S., 2005). К тому же, применение датчиков уровня позволяет только контролировать горизонтальное расположение поворотной платформы не обеспечивая устойчивой работы системы на слабонесущих грунтах в результате неравномерного проседания опор. Постоянное регулирование опор также ведет к снижению производительности машины.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ УСИЛИЙ ПОД ОПОРАМИ

Для разработки устройства горизонтирования проведем теоретическое исследование проседания выносных опор в грунт, т.е. исследуем изменение усилий под опорами. Для этого работу системы горизонтирования самоходных кранов (Becker R., 2001; [www.creativesafetysupply.com/articles/crane-safety](http://www.creativesafetysupply.com/articles/crane-safety), 2017; Ho, J.K. et. al., 2007) представим в виде расчетной схемы приведенной на рис. 1. Выносные опоры располагаются в точках А, В, С и D.

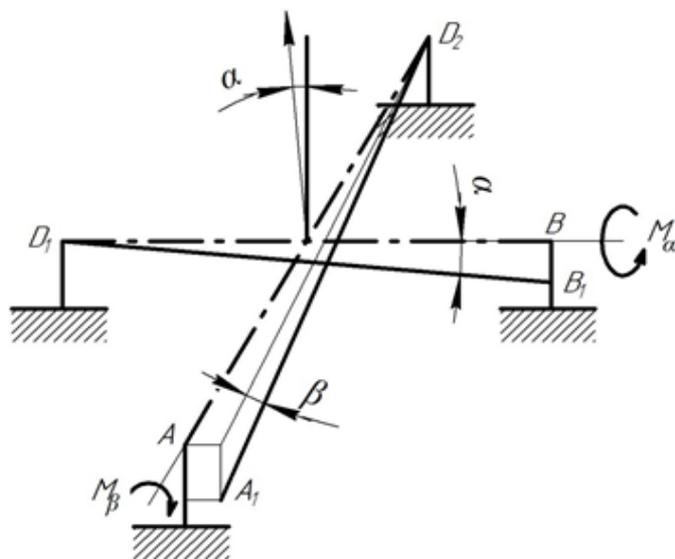


Рис. 1. Модель взаимодействия выносных опор с грунтом

В соответствии с условиями погружения, считаем, что опоры С и D имеют допустимое погружение. На рис. 1 видно, что при погружении опоры В в положение В<sub>1</sub> происходит смещение опоры А вниз и вправо, так как вся система является связанной. В этом случае опора А перемещается в положение А<sub>1</sub>. В этом случае вертикальная ось системы сместится на угол α от вертикали.

Фиксацию отклонений можно проводить датчиками положения типа 13.3843, 13.4847, 40.3706 и т.п. (Sladkova L.A., 2016).

Для фиксирования отклонения точки В необходимо установить датчик D<sub>1</sub> для фиксации положения опоры В и датчик D<sub>2</sub> – для изменения положения опоры А.

Очевидно, что при погружении обозначенных опор в грунт датчиками D<sub>1</sub> и D<sub>2</sub> будут зафиксированы моменты M<sub>β</sub> и M<sub>α</sub> соответственно (см. рис. 1). Другими словами произойдет поворот осей DB и DA на углы α и β, соответственно.

Пользуясь теоремой общего кинематического момента в проекциях на оси, связанной системы координат получим уравнение движения четырехопорной системы (Бутенин Н.В. и др., 2007; Табачков Е.Р. и др., 1987):

$$\begin{cases} J\ddot{\alpha} + h\dot{\alpha} - \mu\beta - H\dot{\beta} = 0 \\ J\ddot{\beta} + h\dot{\beta} - \mu\alpha + H\dot{\alpha} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

где J – момент инерции системы, кг·м<sup>2</sup>;

H $\dot{\alpha}$ , H $\dot{\beta}$  – угловые моменты инерции;

H = JΩ – кинетический момент инерции;

J – собственный момент инерции системы относительно оси вращения;

Ω – угловая скорость вращения системы относительно собственной оси вращения;

h – коэффициент момента сил сопротивления.

Для решения системы дифференциальных уравнений второго порядка, составим характеристическое уравнение (Деч Г., 1970; DIN 15018-3-1984. Cranes).

$$\begin{vmatrix} J\lambda^2 + h\lambda & -H\lambda - \mu \\ H\lambda + \mu & J\lambda^2 + h\lambda \end{vmatrix} = 0. \quad (2)$$

Раскрыв определитель уравнения (2), получим:

$$J^2\lambda^4 + 2J^2h\lambda^3 + (H^2 + h^2)\lambda^2 + 2H\mu\lambda + \mu^2 = 0. \quad (3)$$

Все коэффициенты уравнения (3) больше нуля. В этом случае составим уравнение

$$\Delta_3 = a_1 a_2 a_3 - a_0 a_3^2 - a_1^2 a_4 > 0, \quad (4)$$

где

$$a_0 = J^4$$

$$a_1 = 2Jh$$

$$a_2 = (h^2 + H^2)$$

$$a_3 = 2\mu H$$

$$a_4 = \mu^2$$

Используя вышеприведенные условия, преобразуем уравнение (4) к виду:

$$\Delta_3 = 4\mu J(h^2 + H^2)(hH - \mu J) > 0 \quad (5)$$

Исследуем полученное неравенство (5) при h ≠ 0, т.е. в случае наличия сил сопротивления. Тогда

$$\frac{\Delta}{l} = \frac{\dot{P}}{EA}, \quad (6)$$

### 3. НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ГРУНТА ПОД ОПОРАМИ

Таким образом, для обеспечения горизонтирования поверхности достаточно определить сопротивление в опорах при условии выполнения неравенства (6).

Из анализа неравенства (6) видно, что для достижения этого результата необходимо изменять величину опорной поверхности или моменты инерции системы относительно положения центра тяжести.

Рассмотрим условие изменения напряжения в грунте на примере погружения одной (в точке В) опоры (см. рис. 2), на которую действует внешняя нагрузка интенсивностью  $P$ . Под ее действием опора погружается в грунт на величину  $\Delta$  (Зеленин А.Н., 1968; Зеленин А.Н. и др., 1975; Цытович Н.А., 1983), которую легко определить по основным зависимостям сопротивления материалов (Феодосьев В.И., 2016):

$$\frac{\Delta}{l} = \frac{P}{EA} \quad (7)$$

где  $P = N$  – усилие сжатия грунта, Н;

$E$  – модуль упругости грунта, Па;

$A$  – площадь опоры, м<sup>2</sup>;

$l$  – длина сжатого грунта под опорой, м.

Эпюра изменения сжатия грунта по глубине (рис. 2) в соответствии с зависимостью (6) будет изменяться по закону показательной функции.

$$\Delta = \frac{Nl}{EA};$$

$$\frac{\Delta}{l} = \varepsilon = \frac{N}{EA} = \frac{G}{EA}.$$

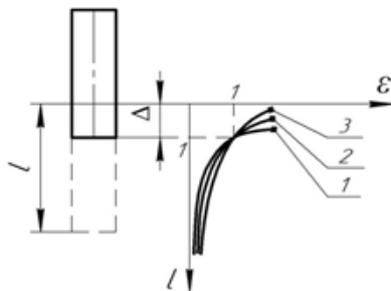


Рис. 2. Изменение напряжений в грунте при погружении плоского штампа в грунт: 1 –  $\Delta l_1$ ; 2 –  $\Delta l_2$ ; 3 –  $\Delta l_3$ . Здесь ( $P_1 > P_2 > P_3$ )

С другой стороны в опоре (точка А) происходит перемещение грунта со смещением на сторону в силу того, что система, представленная на рис. 1 является связанной и геометрически неизменяемой. Смещение представлено на рис. 3.



Рис. 3. Усилие увода опоры А в сторону

Здесь усилие увода определим из соотношения:

$$\frac{q(\Delta l_1)^2}{2} = \frac{P\Delta l_1 \sin \alpha}{2} \leq \frac{[\sigma]}{A}, \quad (8)$$

где  $[\sigma]$  – допускаемое напряжение сжатия в грунте, Па;

$q = P \sin \alpha / \Delta l_1$  – распределенная нагрузка по длине вдавливания опоры в точке А, м.

Из выражения (8) видно, что распределение напряжения под опорой А изменяется по квадратичной зависимости (см. рис. 4).

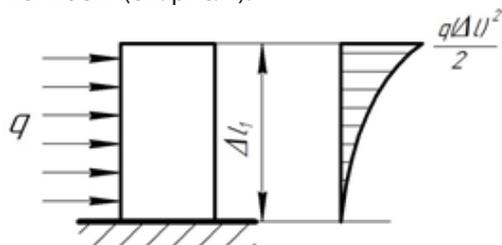


Рис. 4. Погружение опоры в грунт

Из выражения (8), получим:

$$[\sigma] > \frac{PA\Delta l_1 \sin \alpha}{2}. \quad (9)$$

Здесь усилие увода равно:

$$P = G \cdot \sin \alpha \quad (10)$$

Величина изгибающего момента у поверхности опоры равна:

$$M = \frac{ql^2}{2}. \quad (11)$$

Учитывая, что

$$q = \frac{P \sin \alpha}{\Delta l_1} = P \sin \alpha \Delta l_1. \quad (12)$$

Здесь видно, что боковой увод опоры возможен при невыполнении условия (9).

С другой стороны (см. рис. 4) имеем:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{P \sin \alpha \Delta l_1}{ah^2} = \frac{P \sin \alpha \Delta l_1 \cdot 6}{a\Delta l_1^2} = \frac{6P \sin \alpha}{a\Delta l_1}. \quad (13)$$

где  $a$  – сторона опоры.

Тогда

$$\Delta l_1 = \frac{6P \sin \alpha}{\sigma a}.$$

Или

$$\frac{\Delta l_1}{\Delta l_2} = \frac{P \cdot 2R^2}{EA \cdot P} \quad (4)$$

$$q = \frac{P}{\Delta l_1} = \frac{G \cdot \sin \alpha}{\Delta l_1}$$

$$\frac{q(\Delta l_1)^2}{2} = \frac{P \sin \alpha \Delta l_1}{2} < \frac{[\sigma]}{A}$$

$$[\sigma] = \frac{PA \sin \alpha \Delta l_1}{2}$$

Для решения задачи с подкладкой применим способ вариационного исчисления. Считаем, что сила давления равна  $P$  (см. рис. 5).

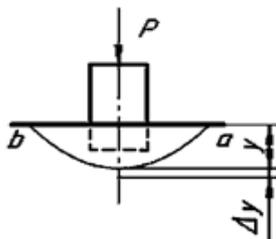


Рис. 5. Погружение опоры в грунт при наличии подкладки

Исследования будем проводить, используя энергетический потенциал системы. Потенциальная энергия системы равна

$$U = c - 2\sigma S + Py = c - 2\sigma\left(S - \frac{P}{2\sigma}y\right) \quad (10)$$

При увеличении просадки  $y$  на  $\Delta y$  происходит погружение на  $\Delta y$ , что ведёт к увеличению  $U$  на величину  $P\Delta y$ .

Задача сводится к определению безусловного экстремума функционала вида

$$S - \frac{P}{2\sigma}y = \int_a^b \left( y - \frac{P}{2\sigma}\sqrt{1 + \dot{y}^2} \right) dx \quad (11)$$

На основе функционала (11), составим уравнение Эйлера

$$\lambda = -\frac{P}{2\sigma} \quad (12)$$

Решение уравнения (12) будет иметь вид [6]:

$$(x + C_1)^2 + (y - C_2)^2 = \alpha^2 \quad (13)$$

Из этого следует, что напряжения будут распределяться по дуге окружности радиуса  $R$ .

$$R = |\alpha| = \sqrt{\frac{P}{2\sigma}} \Rightarrow \sigma = \frac{P}{R^2 \cdot 2} = \varepsilon E \quad (14)$$

Для оценки изменения усилий под опорами сравним выражения (7) и (14).

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{P2R^2E}{EAP} = \frac{2R^2}{A} \quad (15)$$

Для удобства будем считать, давление распределяется непосредственно под опорой, т.е.  $A=R^2$ . Отсюда очевидно, что давление под опорами в первом случае (для не модернизированной системы) будет в два раза выше.

#### 4. РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проведенные теоретические исследования позволили разработать устройство горизонтирования поверхности транспортных средств при работе на слабонесущих грунтах. Устройство обеспечения горизонтирования кранов на слабонесущих грунтах, содержащее ходовое оборудование, выносные опоры (аутригеры), раму с расположенным на ней рабочим оборудованием, причем спереди (сзади) на раме машины установлены кронштейны, в которых горизонтально устанавливается ось со свободно вращающимся барабаном. На барабане намотана лента, которая может опускаться с возможностью свободного вращения барабана. Нижняя часть ленты имеет шарнирно-сочлененную с ней горизонтальную поверхность длиной не менее расстояния от сбегающей ленты с барабана до точки касания ходового оборудования с поверхностью грунта, причём общая длина ленты не менее базы машины.

Барабан с лентой может состоять из двух частей с возможностью перемещения каждой из них вдоль оси. При этом ширина барабана должна быть не менее расстояния между крайними внутренними точками ходового оборудования и внешними

точками выносных опор (аутригеров).

Ось выполнена телескопической с возможностью увеличения крайних точек на расстоянии перекрывающее внешние точки выносных опор.

Предлагаемое устройство позволяет увеличить площадь опорной поверхности, что ведет к обеспечению горизонтирования машин на слабонесущих грунтах. Предлагаемое техническое решение для барабана позволяет уменьшить габариты машины с располагаемым на нем заявляемым устройством обеспечения горизонтирования машин на слабонесущих грунтах.

## 5. ВЫВОДЫ

1. При эксплуатации самоходных кранов на слабонесущих грунтах нарушается устойчивая работа конструкции в результате нарушения горизонтального расположения поворотной платформы из-за проседания опор выносных опор в грунт.
2. Предлагаемое нами устройство позволяет увеличить опорную поверхность самоходного крана. Оно представляет собой гибкие ленты, выполненные из шарнирно сочлененных звеньев (типа траков) или полос материала (тонколистовой прокатный металл и т.п.), расположенных в передней части крана на специально установленных барабанах по ходу движения машины.

## 6. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бутенин Н.В., Лунц Я.Л., Меркин Д.Р. Курс теоретической механики. Т.2. – СПб.: Лань, 2008.
2. Грузоподъемные машины: Учебник для вузов по специальности «Подъемно-транспортные машины и оборудование» / М. П. Александров, Л. Н. Колобов, Н. А. Лобов и др.: — М.: Машиностроение, 1986. – 400 с.
3. Деч Г. Руководство к практическому применению методов Лапласа - М: Физматгиз, 1970. – 220 с.
4. Зеленин А.Н. Основы разрушения грунтов механическими способами. – М.: Машиностроение, 1968. – 376 с.
5. Зеленин А.Н., Баловнев В.И., Керов И.П. Машины для земляных работ. – М.: Машиностроение, 1975. – 424 с.
6. Комплексная механизация в дорожном строительстве /А.М. Щемелев [и др.]; под ред. А.М. Щемелева. – Могилев : Беларус. – Рос. Ун-т, 2006. 540 с.
7. Опора для слабонесущих грунтов: а. с. 1342870 СССР: МКИЗ В 66 С 23/78 / Е.Р. Табачков, А.В. Козин и О.Л. Тюфяков (СССР). – № 4249942/40–11; заявл. 11.05.87; опубл. 07.05.89, Бюл. № 17. – 2 с.
8. Сладкова Л.А. Исследования и испытания наземных транспортно-технологических машин: Учебное пособие. М.: МГУПС (МИИТ), 2016. – 275 с.
9. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики. –М.: Высш. шк.,-2013.- 417с.
10. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – 613 с.
11. Цытович Н.А. Механика грунтов. Краткий курс Учебник для строительных вузов. – Изд. 4-е перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1983. – 288 с.
12. Arnold, V.I., Vogtmann, K., Weinstein A. (1989) *Mathematical Methods of Classical Mechanics* (2nd ed.). New York: Springer.
13. Beavers, J.E., Moore, J.R., Rinehart, R., Schriver, W.R. (2006). «Crane Related Fatalities in the Construction Industry.» *Journal of Construction Engineering and Management*, 132(9), 901-910.
14. Becker, R. (2001). *The great book of mobile and crawler cranes. Vol.1 – Handbook of mobile and crawler crane technology.* Griesheim, Germany: KM Verlags GmbH.

15. Creative safety supply. Crane safety [Online] Available: <http://www.creativesafetysupply.com/articles/crane-safety> (July 12, 2017)
16. DIN 15018-3-1984 Cranes; principles relating to steel structures; design of cranes on vehicles.
17. Duerr, D. (2015) Mobile Crane Support. New York: Levare Press, Inc.
18. Headley, J. (2014) Mobile Crane (10th ed.). Sanford, Fla.: Crane Institute of America.
19. Ho, J.K., Seo, J.M., Kim, S.K. (2007) Mobile crane ground fixing system. Korea Institute of Ecological Architecture and Environment, 7(6), 83–90.
20. International standard ISO 4310(E). Cranes-Test code and procedures. Second edition/ Published by ISO/Geneva, Switzerland. 2009, — 10 pages.
21. Kim, H.H., Lee, K. (2007) An analysis of the accident types and causes of construction cranes. Korea Institute of Construction Engineering, 7(1), 109–112.
22. Krastanov K. (2017). About the safety by using of mobile cranes. The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM), Volume 1, 213-217.
23. Tamate, S., Naoaki, S., Toshiyuki, K. (2005) Analyses of instability in mobile cranes due to ground penetration by outrigger. Journal of Construction Engineering and Management, 131(6), 689–704.
24. Verschoof, J. (2002) Cranes – Design, Practice, and Maintenance (2nd ed.). London: Professional Engineering Publishing.

## REFERENCES

1. Butenin N.V., Lunz J.I., Merkin D.R. Course of theoretical mechanics. T. 2. – St-P.: LAN, 2008.
2. Lifting machinery: a textbook for universities, majoring in hoisting-and-transport machines and equipment/M. P. Aleksandrov, I. N. Kolobov, N. A. Lobov, etc.: -m.: mashinostroenie, 1986. – 400 p.
3. Dech G. Guide to the practical application of Laplace. – M.: Phismathgiz, 1970. – 220 p.
4. Zelenin A.N. Basics destruction of soils by mechanical means. – M.: Mashinostroenie, 1968. -376 p.
5. Zelenin F.N., Balovnev V.I., Kerov I.P. Machines for excavation works. – M.: Mashinostroenie, 1975. – 424 p.
6. Comprehensive mechanization in road construction/A. Schemelev [et al.]; Ed. A.m. Shchemelev. -Mogilev: Belarusian. -Grew up. University, 2006. 540 s.
7. Support for soft soils: a. s. 1342870: MKI 3 B 66 C 23/78/E.R. Tabachkov, A.V. Kozin and O.L. Mattresses (USSR). - No. 4249942/40-11; Appl. 11.05.87; in English. 07.05.89, Director. No. 17. - 2 p.
8. Sladkova L.A. Research and testing ground transportation and technological mashin. – M.: MGUPS (MIIT), 2016. - 275 p.
9. Targ S.M. Short course of theoretical mechanics. -M.: Top. NIS, -2013.-417 s.
10. Feodosev V.I. Resistance of materials. – M.: Publish. House MGTU by Bayman name, 2016. -613 p.
11. Cytovich N.A. Soil mechanics. Short course tutorial for building universities. - Ed. 4-e revised. and extras. – M.: Top. nis, 1983. – 288 p.
12. Arnold, V.I., Vogtmann, K., Weinstein A. (1989) Mathematical Methods of Classical Mechanics (2nd ed.). New York: Springer.
13. Beavers, J.E., Moore, J.R., Rinehart, R., Schriver, W.R. (2006). «Crane Related Fatalities in the Construction Industry.» Journal of Construction Engineering and Management, 132(9), 901-910.
14. Becker R. (2001). The great book of mobile and crawler cranes. Vol.1 – Handbook of

- mobile and crawler crane technology. Griesheim, Germany: KM Verlags GmbH.
15. Creative safety supply. Crane safety [Online] Available: <http://www.creativesafetysupply.com/articles/crane-safety> (July 12, 2017)
  16. DIN 15018-3-1984 Cranes; principles relating to steel structures; design of cranes on vehicles.
  17. Duerr, D. (2015) Mobile Crane Support. New York: Levare Press, Inc.
  18. Headley, J. (2014) Mobile Crane (10th ed.). Sanford, Fla.: Crane Institute of America.
  19. Ho, J.K., Seo, J.M., Kim, S.K. (2007) Mobile crane ground fixing system. Korea Institute of Ecological Architecture and Environment, 7(6), 83–90.
  20. International standard ISO 4310(E). Cranes-Test code and procedures. Second edition/ Published by ISO/Geneva, Switzerland. 2009, — 10 pages.
  21. Kim, H.H., Lee, K. (2007) An analysis of the accident types and causes of construction cranes. Korea Institute of Construction Engineering, 7(1), 109–112.
  22. Krastanov K. (2017). About the safety by using of mobile cranes. The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM), Volume 1, 213-217.
  23. Tamate, S., Naoaki, S., Toshiyuki, K. (2005) Analyses of instability in mobile cranes due to ground penetration by outrigger. Journal of Construction Engineering and Management, 131(6), 689–704.
  24. Verschoof, J. (2002) Cranes – Design, Practice, and Maintenance (2nd ed.). London: Professional Engineering Publishing.