

УДК 624.04 (075)

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОНУСНОГО РАСКАТЧИКА  
ДЛЯ ГЛУБОКОГО УПЛОТНЕНИЯ ОСНОВАНИЙ ДОРОГSELECTION OF RATIONAL PARAMETERS OF THE CONE ROLLER  
FOR DEEP COMPACTION OF ROAD BASESТиллоев К.З., Кромский Е.И., Кондаков С.В.  
Tilloev K.Z., Kromsky E.I., Kondakov S.V.Южно-Уральский государственный университет (Челябинск, Россия)  
South Ural State University (Chelyabinsk, Russian Federation)

**Аннотация.** Статья посвящена методике проектирования конусного раскатчика для глубокого уплотнения грунта, используемого в качестве рабочего органа гусеничного экскаватора. Одним из важных конструктивных параметров конусного раскатчика является угол конуса. Известные методики позволяют определить угол конуса для других технологических задач, например, для разрыхления мерзлого грунта и не могут быть напрямую применены для решения поставленной задачи. Авторами предложена оригинальная методика выбора рациональных параметров конусного раскатчика, в том числе, угол конуса. В методике использована математическая модель взаимодействия конусного раскатчика с уплотняемым грунтом. В процессе решения математической модели определены следующие параметры: зависимость части площади боковой поверхности конуса, зависимость объема вытесненного грунта на контактной поверхности конуса от пятна контакта, суммарная сила, сила конусного раскатчика, действующая на грунт при кручении, и осевое усилие при внедрении конуса, прикладываемое стрелой экскаватора. Для выявления оптимального значения угла конуса проведено исследование функции объема вытесняемого грунта от угла конуса и осевого усилия при внедрении от угла конуса. В итоге определено, что оптимальным углом конуса является  $24^{\circ}$ , который обеспечит наибольшую эффективность по критерию производительность / затраты.

**Ключевые слова:** гусеничный экскаватор, конусный раскатчик, угол конуса, уплотнения грунта, пятно контакта.

**Дата принятия к публикации:** 20.02.2021  
**Дата публикации:** 25.03.2021

**Сведения об авторах:**

**Тиллоев Кудратулло Зувайдуллоевич** – аспирант кафедры «Колесные и гусеничные машины» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ),  
e-mail: kudratullo.tilloev@bk.ru.

**Кромский Евгений Ильич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры

**Abstract.** The article is devoted to the method of designing a cone roller for deep compaction of soil used as the working body of a crawler excavator. One of the most important design parameters of a cone roll is the angle of the cone. Known methods allow determining the cone angle for other technological tasks, for example, for loosening frozen soil, and cannot be directly applied to solve the problem. The authors propose an original method for selecting rational parameters of a cone roller head, including the angle of the cone. The method uses a mathematical model of the interaction of a cone roller with compacted soil. In the process of solving the mathematical model are the following parameters: the dependence of the area of the lateral surface of a cone, the dependence of the volume of displaced soil on the contact surface of the cone from the contact patch, the total force, cone force acting on the ground torsional, and axial force in the implementation of the cone, applied by the excavator boom. To identify the optimal value of the cone angle, the function of the volume of displaced soil from the cone angle and the axial force during penetration from the cone angle was studied. As a result, it is determined that the optimal angle of the cone is  $24^{\circ}$ , which will provide the greatest efficiency according to the performance / cost criterion.

**Keywords:** crawler excavator, cone roller, cone angle, soil compaction, contact spot.

**Date of acceptance for publication:** 20.02.2021  
**Date of publication:** 25.03.2021

**Authors' information:**

**Kudratullo Z. Tilloev** – postgraduate of Department «Wheeled and Tracked Vehicles» at South Ural State University, e-mail: kudratullo.tilloev@bk.ru.

**Evgeni I. Kromsky** – PhD in Technical Sciences, associate Professor, Professor of Department «Wheeled



«Колесные и гусеничные машины» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ), e-mail: [ekromskiy@mail.ru](mailto:ekromskiy@mail.ru).

**Кондаков Сергей Владимирович** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Колесные и гусеничные машины» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ), e-mail: [tanksv@mail.ru](mailto:tanksv@mail.ru).

and Tracked Vehicles» at South Ural State University, e-mail: [ekromskiy@mail.ru](mailto:ekromskiy@mail.ru).

**Sergey V. Kondakov** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department «Wheeled and Tracked Vehicles» at South Ural State University, e-mail: [tanksv@mail.ru](mailto:tanksv@mail.ru).

## 1. Введение

Строительство автомобильных дорог всегда требует значительной предварительной подготовки, в основном это связано с необходимостью уплотнения дорожного полотна. Уплотнение грунтовых оснований земляного полотна является эффективным методом улучшения физико-механических свойств основания дорожного полотна. Причем уплотнять приходится не только поверхностный слой, но и слои, лежащие на глубине нескольких метров. Игнорирование этого фактора приводит к быстрому выходу из строя дорожного полотна, заключающемуся в появлении колеи и выбоин. В итоге, становится невозможным эксплуатировать дорогу в соответствии с техническим заданием. Эти проблемы могут быть решены за счет изменения технологии уплотнения основания дорожного полотна и модернизации механизмов для уплотнения грунта на базе гусеничного экскаватора.

Послойное уплотнение грунта толщиной до 0,8 м выполняют грунтоуплотняющие машины, такие как дорожные катки, трамбовки, вибротрамбовки и др. разного типа и размеров [1, 2].

При использовании послойного уплотнения грунта часть жидкости и воздуха запрессовывается в уплотненный грунт, образуя неравномерную структуру. Увеличение массы и мощности базовых колесных и гусеничных машин только усугубляет это явление.

Обработка насыпных и пористых материалов различных инженерных сооружений может осуществляться с использованием специального оборудования [3-6]. При уплотнении грунтов на большую глубину, достигающую нескольких метров, - это земляное полотно автомобильных дорог, дамбы, плотины и дру-

гие насыпи, используют оборудование для глубокого уплотнение грунта.

Существующие специальные механизмы для работы с повышенными толщинами слоев материала без выемки грунта используют навесное оборудование колесных и гусеничных машин в виде многотонных конусообразных грузов или раскатчиков в виде винта. Данные механизмы уплотняют грунт на значительную толщину - порядка 4...6 м.

При использовании техники для глубокого уплотнения в виде свай без выемки грунта эффект компрессионного сжатия газа внутри уплотняемого грунта также сохраняется.

Таким образом, механизмы для поверхностного уплотнения грунтов и часть механизмов глубокого уплотнения запрессовывают воздух внутрь уплотняемого грунта, что способствует в дальнейшем достаточно быстрому разрушению уплотненного ранее грунта.

Новое направление совершенствования машин для уплотнения, которому посвящена данная работа, – это уплотнение на большую глубину, позволяющее увеличить грузоподъемность дороги, повысить нагрузку от автомобиля на единицу проезжей части, повысить прочность основания дороги, минимизировать фильтрацию воздуха как внутри всего основания земляного полотна, так и сквозь его отдельные элементы для обеспечения устойчивости структуры грунта.

В процессе выполнения работ по уплотнению основания дорог, промышленных и гражданских объектов особое внимание уделяется выбору рациональных параметров уплотняющих машин и механизмов.

Целью данного исследования является выбор рациональных параметров рабочего оборудования экскаватора, в частности, конусного раскатчика, что расширяет потребительские свойства гусеничного экскаватора.

## 2. Объект исследования

Объектом является гусеничный экскаватор, оборудованный конусным раскатчиком для глубокого уплотнения грунта (рис.1) [7].

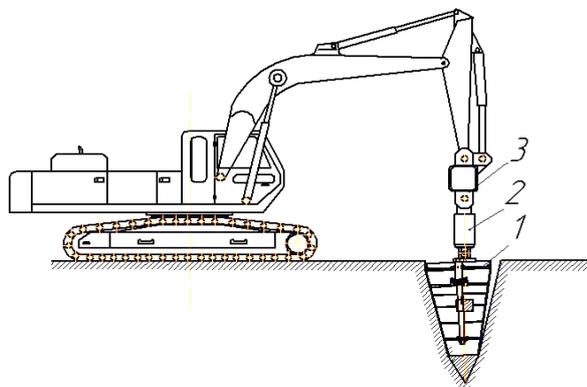


Рис.1. Конусный раскатчик на базе гидравлического экскаватора: 1 – конусный раскатчик; 2 – гидровращатель; 3 – траверса

Конусный раскатчик (рис. 2) состоит из внешнего корпуса конусообразной оболочки 1, вала коленчатой формы 2, опоры для подшипников 3, 4 и противовеса 5. Схема конфигурации разрабатываемого объекта (рис. 3) с учетом большого диаметра конуса и эксцентриситета коленчатого вала:

$$D = 2e + d,$$

где  $D$  – диаметр котлована;  $d$  – диаметр рабочего органа;  $e$  – эксцентриситет коленчатого вала.

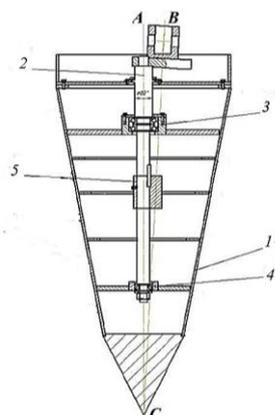


Рис. 2. Конусный раскатчик

Приводное прецессирующее звено 2 через подшипниковые опоры 3 и 4 периодически обкатывает грунтовый котлован последовательно вдавливая секторообразный объ-

ем материала в глубь грунтового массива, перемещая при этом частицы грунта из области максимального давления в сторону уплотнённого грунта.

Динамическая уравновешенность механической системы обеспечивается установкой противовеса 5 на коленчатом валу 2.

Вращающиеся детали узлов 3 и 4 установлены внутри корпуса 1, тем самым изолированы от внешней абразивной среды, что обеспечивает им надежную и долговечную работу в сравнении с известными ранее техническими устройствами [3-6].

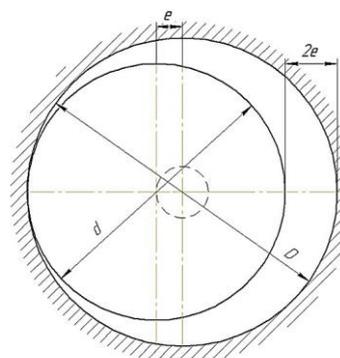


Рис. 3. Схема раскатки котлована (вид сверху)

Отличием нового технического решения является пересечение осей вращения приводного двигателя (А) и коленчатого вала (В) в точке при вершине конуса (С). В новой конструкции рассматриваемого механизма в процессе работы вершина конуса (С) перемещается по прямой линии.

## 3. Теоретические исследования

В соответствии с целью исследования была разработана математическая модель работы гусеничного экскаватора с навесным оборудованием, включающая в себя параметры базовой машины, геометрические размеры конусного раскатчика и физико-механические свойства грунта.

Затрачиваемая работа при уплотнении грунта новым рабочим органом зависит от угла конуса и физико-механические свойства грунта. Экспериментальные исследования [10] установили зависимость минимальной энергоемкости процесса внедрению конуса

для внедрения конусной штанги в мерзлый грунт до значения предела его прочности при рациональном угле заострения  $\alpha = 25...30^\circ$ .

Использовать результаты [10] напрямую не представляется возможным. Это связано с различием технологических целей: разрыхление мерзлого грунта кардинально отличается от уплотнения рыхлого грунта.

Расчетная схема взаимодействия конуса с уплотняемым грунтом приведена на рис. 4.

Для моделирования нового технологического оборудования в среде программирования VisSim в качестве исходных данных заданы геометрические параметры конусного раскатчика и образующей скважины в произвольной точке.

Геометрия среднего сечения конуса определена в соответствии с зависимостями (1) и (2) (рис. 4):

$$y_R = \sqrt{R^2 + x^2}; \quad (1)$$

$$y_r = e + \sqrt{r^2 + x^2}, \quad (2)$$

где  $x, y_R$  – координаты точки на среднем сечении скважины;  $x, y_r$  – координаты точки на среднем сечении конуса;  $R$  – радиус образующей скважины;  $r$  – радиус конусного раскатчика.

Расчет площади внедрения конуса с грунтом определён по формуле (3):

$$\delta = \int_0^{X_{\max}} (e + h + \sqrt{r^2 + x^2} - \sqrt{R^2 + x^2}) dx. \quad (3)$$

Размер  $X_{\max}$  определён из условия

$$R^2 - x^2 = (e - h)^2 + 2(e - h)(r^2 - x^2) + r^2 - x^2;$$

$$R^2 - r^2 - (e - h)^2 = 2(e - h)\sqrt{r^2 - x^2};$$

$$\frac{R^2 - r^2 - (e - h)^2}{2(e - h)} = r^2 - x^2.$$

Отсюда

$$x^2 = r^2 - \left( \frac{R^2 - r^2 - (e - h)^2}{2(e - h)} \right)^2,$$

где  $h$  – толщина перемещения грунта при контактной поверхности с конусом.

Половина угла охвата в среднем сечении конуса грунтом определена по формуле:

$$\alpha = \left( \frac{x}{h} \right). \quad (4)$$

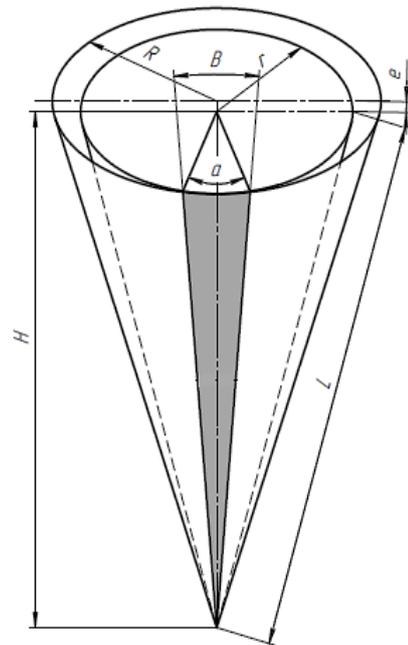


Рис. 4. Расчетная схема конуса при контакте с грунтом

Среднее перемещение грунта в среднем сечении конуса зависит от площади внедрения конуса, половины угла охвата и радиусом конуса.

Общая площадь боковой поверхности конуса (рис. 2) составляет

$$S_{\text{бок}} = \pi \cdot r \cdot L, \quad (5)$$

где  $L$  – длина ребра конуса, равная 1460 мм.

Часть площади боковой поверхности конуса, которая непосредственно контактирует с уплотняемым грунтом, определена в соответствии с блок-схемой рис. 5.

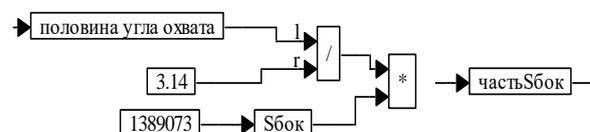


Рис. 5. Блок-схема определения часть площади боковой поверхности конуса

При координате конечной точки контакта конуса с грунтом  $x = 85$  мм часть площади боковой поверхности конуса равна  $S_{\text{бок}}^{\text{часть}} = 194831 \text{ мм}^2$  (рис. 6).

Объём вытеснения грунта на контактной поверхности конуса составляет

$$V_{\text{конт}} = \frac{\alpha}{2\pi} S_{\text{бок}} \cdot h_{\text{ср}}, \quad (6)$$

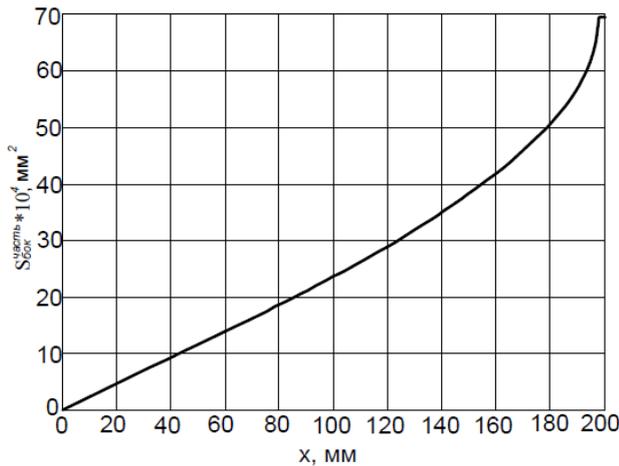


Рис. 6. Зависимость часть площади боковой поверхности конуса от пятна контакта

где  $h_{cp}$  – среднее перемещение грунта в среднем сечении конуса.

По рис. 7 при  $x = 85$  мм объём вытесненного грунта на контактной поверхности конуса равен  $v_{конт} = 493041$  мм<sup>3</sup>.

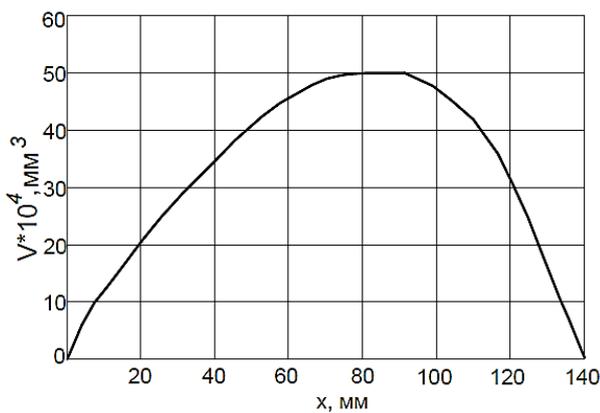


Рис. 7. Зависимость объёма вытеснения грунта на контактной поверхности конуса от пятна контакта

В результате определения площади контакта конусного раскатчика с грунтом и объёма вытесняемого грунта, что открывает возможность для оценки силовых показателей.

Суммарная сила согласно рис. 8 определена по формуле:

$$P_{\Sigma} = \sigma \cdot S_{бок}^{часть}, \quad (7)$$

где  $\sigma$  – напряжение на контактной поверхности конуса;  $S_{бок}^{часть}$  – часть площади боковой поверхности конуса, мм<sup>2</sup> (рис. 6).

Напряжение  $\sigma$  составляет

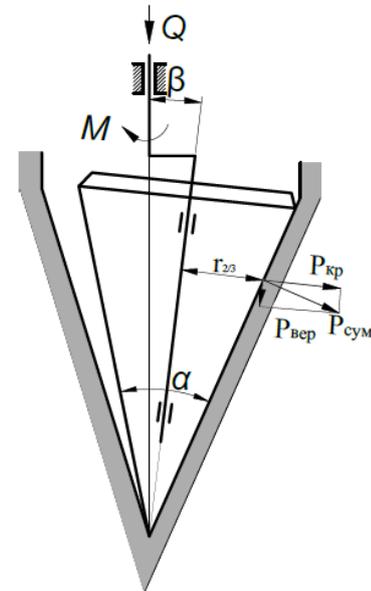


Рис. 8. Расчетная схема приложение сил

$$\sigma = C \cdot x^{\mu}, \quad (8)$$

где  $C$  – коэффициент общей деформации грунта, Н/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – показатель степени, характеризующий процесс деформации;  $x$  – деформация радиуса скважины, определяемая зависимостью

$$x = r + e. \quad (9)$$

Ранее было установлено [11, 12], что коэффициент общей деформации грунта  $C$  выбирается по показателю текучести грунта со следующими значениями:

$$C = (1,1-2,9) \cdot 10^6, \text{ Н/м}^3 \text{ при } 0,25 < I_L \leq 0,5,$$

$$C = (2,2-4,8) \cdot 10^6, \text{ Н/м}^3 \text{ при } 0,6 < I_L \leq 1,0,$$

где  $I_L$  – показатель текучести грунта.

Коэффициент общей деформации уменьшается с увеличением показателя текучести.

В статье рассмотрена работа конусного раскатчика в грунтах с показателем текучести  $0 < I_L \leq 0,75$ , что соответствует полутвердым, тугопластичным и мягкопластичным суглинкам, глинам и пластичным супесям.

Сила конусного раскатчика, действующая на грунт при кручении:

$$P_{кр} = P_{\Sigma} \cdot f_{mp}, \quad (10)$$

где  $f_{mp}$  – коэффициент трения грунта по стали (для песка  $f_{mp} = 0,35 \dots 0,5$ , для супесей и суглинка  $f_{mp} = 0,5 \dots 0,6$ , для глины  $f_{mp} = 0,6 \dots 0,7$  [13]).

Осевое усилие при внедрении конуса определяется зависимостью

$$P = \frac{\frac{Q}{2}}{\sin \frac{\alpha_k}{2} + \beta}. \quad (11)$$

Отсюда

$$Q = 2 \cdot P_{кр} \cdot \sin \frac{\alpha_k}{2} + \beta,$$

где  $P_{кр}$  – сила воздействия конусного раскатчика на грунт при кручении;  $\alpha_k$  – угол при вершине конуса;  $\beta$  – угол прецессии вала (рис. 8).

#### 4. Результаты исследования

Исследование проведено численным методом на примере промышленного образца конусного раскатчика. Результаты исследования приведены на рис. 9.

Для выявления оптимального значения угла конуса проведено исследования функции объема вытесняемого грунта от угла конуса  $V(\alpha)$  и осевого усилия рабочего органа при внедрении в грунт от угла конуса  $Q(\alpha)$ .

Под объёмом вытесняемого грунта подразумевается объём уплотняемого грунта в пятне контакта.

Анализ графиков показал:

– функция  $V(\alpha)$  имеет монотонный вид с тенденцией роста  $\frac{dV}{d\alpha} = 1981 \text{ мм}^3/\text{град}$ ;

– функция  $Q(\alpha)$  имеет перелом тенденции. В диапазоне  $20 \dots 24^\circ$  прирост составляет  $\frac{dQ}{d\alpha} = 1743 \text{ Н/град}$ , в диапазоне  $24 \dots 30^\circ$  –  $\frac{dQ}{d\alpha} = 2632 \text{ Н/град}$ .

При увеличении угла конуса больше  $24^\circ$  потребуются увеличение осевого усилия на

единицу прироста производительности примерно в 1,5 раза.

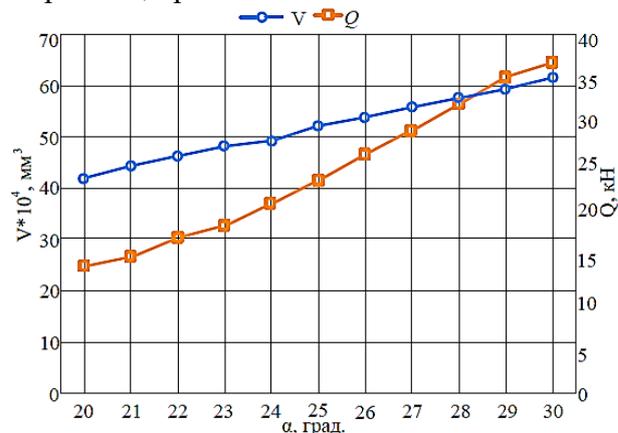


Рис. 9. Зависимость значения функции  $V(\alpha)$  и  $Q(\alpha)$

#### 5. Заключение

1. Разработана методика оптимизации угла конуса раскатчика для глубокого уплотнения грунта в основании дорог, промышленных и гражданских объектов.

2. Методика оптимизации апробирована для конусных раскатчиков с диаметром основания от 500 до 750 мм, длина ребра конуса 1460 мм и углом конуса от 20 до 30 градусов.

3. Выбран критерий оптимизации угла конуса по соотношению интенсивностей нарастания объема вытесняемого грунта и осевого усилия, приложенного стрелой экскаватора. Интенсивность нарастания объема вытесняемого грунта монотонна во всем диапазоне и равна  $1981 \text{ мм}^3/\text{град}$ , а интенсивность нарастания осевого усилия имеет перелом: в диапазоне  $20 \dots 24^\circ$  прирост составляет  $1743 \text{ Н/град}$ , в диапазоне  $24 \dots 30^\circ$  –  $2632 \text{ Н/град}$ .

4. Определен оптимальный угол конуса, равный  $24^\circ$ .

## Список литературы

1. Хартута Н.Я., Васильев Ю.М. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1975. 278 с.
2. Баловнев В.И., Глаголев С.Н., Данилов Р.Г. Погрузочно-разгрузочные и уплотняющие машины. Белгород: Изд-во БГТТУ, 2011. 464 с.
3. Миронов В.С., Фадеев П.Я., Фадеев В.Я., Мандрик М.С. Технология и оборудование для глубокого трамбования грунта // Строительные и дорожные машины. 2015. № 8. С. 2-4.
4. Луцкий С.Я., Сакун А.Б. Интенсивная технология упрочнения слабых оснований земляного полотна // Транспортное строительство. 2015. №8. С. 18–22.
5. Minaev O.P. Russian methods and equipment for spatial vibrocompaction foundations and structures // 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ARC 2015: New Innovations and Sustainability, pp. 2747-2750. doi: 10.3208/jgssp.TC305-11
6. Massarsch, K.R., Fellenius, B.H. Evaluation of resonance compaction of sand fills based on cone penetration tests // Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement, 170 (3), pp. 149-158. DOI: 10.1680/jgrim.17.00004.
7. Кромский Е.И. Конусный раскатчик к гусеничному экскаватору // Вестник ЮУрГУ. Серия Машиностроение. 2018. Т.18. №1. С. 34-39. DOI: 10.14529/engin180104.
8. Кромский Е.И. Новое сменное оборудование гидравлического экскаватора // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. 2018. № 3. С.50-54.
9. Kromsky E.I., Kondakov S.V., Tilloev K.Z. Promising Machine for Compacting Road-Building Materials // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Vol.1. P. 21–28. DOI: 10.1007/978-3-030-22041-9\_3.
10. Мартюченко И.Г., Иванов С.В. Выбор рациональных размерно-геометрических параметров мерзлоторыхлительного оборудования // Строительные и дорож-

## References

1. Harkhuta N.Ya., Vasiliev Yu.M. Strength, stability and compaction of soils of the roadbed. Moscow, Transport, 1975. 278 p. (In Russian).
2. Balovnev V.I., Glagolev S.N., Danilov R.G. Loading and unloading and sealing machines. Belgorod, 2011. 464 p. (In Russian).
3. Mironov V.S., Fadeev P.Ya., Fadeev V.Ya., Mandrik M.S. Technology and equipment for deep tamping of soil. *Stroitelnye i dorozhnye mashiny*, 2015, No. 8, pp. 2-4. (In Russian).
4. Lutsky S.Ya., Sakun A.B. Intensive technology of strengthening of weak foundations of the roadbed. *Transportnoe stroitelstvo*, 2015, No.8, pp. 18-22. (In Russian).
5. Minaev O.P. Russian methods and equipment for spatial vibrocompaction foundations and structures. In: 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ARC 2015: New Innovations and Sustainability, pp. 2747-2750. DOI: 10.3208/jgssp.TC305-11.
6. Massarsch, K.R., Fellenius, B.H. Evaluation of resonance compaction of sand fills based on cone penetration tests. In: Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement, 170 (3), pp. 149-158. DOI: 10.1680/jgrim.17.00004.
7. Kromsky E.I., Koodakov S.V., Tilloev K.Z. Cone Rolling to Crawler Excavator. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2018, vol. 18, No. 1, pp. 34-39. DOI: 10.14529/eogin180104. (In Russian).
8. Kromsky, E.I., Kondakov S.V., Tilloev K.Z., Kadyrova H.I. New replacement equipment of a hydraulic excavator. *Polytechnic Bulletin. Series Engineering research*, 2018, No. 3, pp. 50-54. (In Russian).
9. Kromsky E.I., Kondakov S.V., Tilloev K.Z. Promising Machine for Compacting Road-Building Materials. In: Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Vol. 1. P. 21–28. DOI: 10.1007/978-3-030-22041-9\_3.
10. Martyuchenko I.G., Ivanov S.V. Se-

