

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА РАБОТЫ КОНУСНОГО РАСКАТЧИКА

К.З. Тиллоев

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Выбор типа конструкции уплотняющих машин зависит от многих факторов: вида уплотняемого материала (грунт, щебень, гравий, шлак, скальные крупнообломочные грунты, асфальтобетон, бетон); состояние грунта (оптимальной влажности, переувлажненные, водонасыщенные, насыпные, просадочные); толщины уплотняемых слоев (последовательное уплотнение тонкими слоями, уплотнение сразу на всю толщину отсыпки до проектной отметки) и условий работы машины (стесненные условия, широкий фронт работ). В статье представлена конструкция агрегата для глубинного трамбования грунта, разработанная специалистами института гидродинамики «Сибирское отделение российской академии наук» (СО РАН) и его конструкторско-технологического филиала. На основе оценки достоинств и недостатков агрегата для глубинного трамбования грунта предложено новое техническое решение на основе конусного раскатчика, обеспечивающее более благоприятные условия для удаления воздуха из массива уплотняемого материала. Представлена математическая модель конусного раскатчика с использованием метода разложения периодической функции в ряд Фурье, с помощью которой определена постоянная сила и сумма гармонических сил в процессе работы конусного рабочего органа. Главным рабочим органом машины для конусной раскатки грунтовых оснований автомобильных дорог являются катки с переменным диаметром по высоте. При качении рабочий орган воздействует на уплотняемую поверхность в узкой зоне, в центре которой сжимающее усилие будет максимальным, а по краям уплотняющей зоны оно уменьшается до нуля. Рассмотрены конструкции физической модели конусного раскатчика в виде одного катка и самоцентрирующийся рабочий орган с несколькими катками.

Ключевые слова: уплотнение материалов, устройство для уплотнения, глубинное трамбование, конусный раскатчик, прецессирующий вал.

Насыпные дорожно-строительные материалы и просадочные грунты перед возведением на них сооружений подлежат искусственному уплотнению.

Уплотняющие машины различаются по следующим основным методам уплотнения: укатка (рабочий орган – уплотняющий каток перемещается по поверхности уплотняемого материала); трамбование – ударное воздействие достигается периодическими ударами рабочей плиты по уплотняемому материалу; вибрационное воздействие (материалу сообщают кратковременные, следующие один за другим импульсы). Относительным недостатком дорожных машин для уплотнения дорожно-строительных материалов является небольшая высота отсыпаемых слоев грунта 0,3–0,8 м. Более высокие земляные сооружения (насыпи, дамбы, плотины и т. д.) приходится изготавливать многослойными, что приводит к неоднородности уплотнения грунтов и, как следствие, к последующим деформациям от внешних нагрузок [1–11].

Для больших объемов земляных работ (высота насыпи и их протяженность) требуется более современная техника и технология уплотнения грунтов.

Специалистами института гидродинамики «Сибирское отделение российской академии наук» (СО РАН) и его конструкторско-технологического филиала разработан и применяется агрегат для глубокого трамбования грунта (рис. 1 а, б), который раздвигает грунт в горизонтальном направлении, образуя конический котлован. В образовавшиеся котлованы засыпаются более прочные материалы (рекомендуется щебень, песок и т. д.), которые дополнительно уплотняются дорожными катками (виброкатками). В результате использования агрегата для глубокого трамбования грунта и проведенных исследований плотность грунта повышается на 20–30 % и в 2–3 раза увеличивается его несущая способность [12].

Экономический эффект от использования нового агрегата при строительстве 9-этажного жилого дома составляет 810,4 тыс. рублей [12].



Рис. 1. Агрегат для глубинного трамбования грунта: а – рабочее положение; б – положение простоя

Относительным недостатком агрегата для глубокого трамбования грунта является большая контактная поверхность рабочего органа с грунтом. Контактная поверхность рабочего органа при диаметре основания конусной оболочки, внедряемой в грунт, равной 0,9 м, и высоте конуса 3 м достигает 6 м², что требует больших затрат мощности для раздвижки грунта в горизонтальном направлении при работе гидропневматического молота. Конусная оболочка рабочего органа агрегата герметизирует пространство вокруг боковой поверхности конуса, поэтому воздух движется внутрь массива грунта при внедрении оболочки. Такая технология является «воздухозащемляющей».

Сотрудники Южно-Уральского государственного университета (ЮУрГУ) предлагают усовершенствовать технику глубинного уплотнения методом раскатки котлована рабочим органом в виде конического катка [13].

Главное преимущество предложенного метода состоит в уменьшении площади контакта рабочего органа с грунтом в несколько раз, потому что длина дуги \overline{AB} во много раз меньше длины окружности рабочего органа агрегата для глубинного трамбования грунта (рис. 2).

В процессе работы нового рабочего органа создаются условия для непрерывного выхода воздуха из массива грунта за счет наличия зазоров между рабочим органом и поверхностью котлована. Такая технология названа нами «воздухоудаляющей».

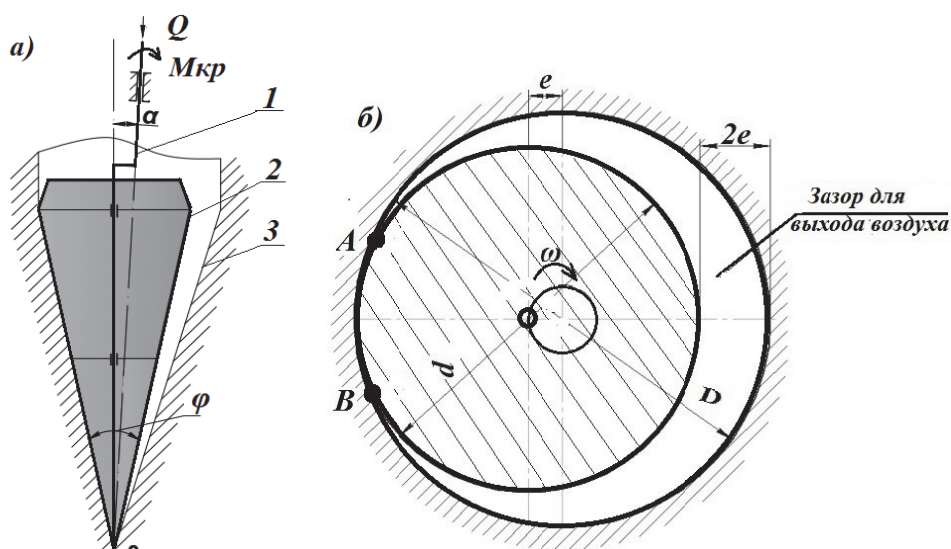


Рис. 2. Схема конусной раскатки котлована: а – вид сбоку; б – вид сверху.
1 – прецессирующий вал; 2 – рабочий орган; 3 – котлован

Рабочим органом нового устройства является конус 2 с углом φ при вершине (точка O) $\varphi < \frac{\pi}{2}$.

Ведущим звеном конусного рабочего органа является коленчатый вал (прецессирующий вал) 1, который связан с приводом вращения (привод на рис. 2 условно не показан). Участки коленчато-

Расчет и конструирование

го вала расположены под углом α друг к другу и пересекаются в точке (О), совпадающей с вершиной конуса 2. При вращении коленчатого вала 1 и воздействии осевой нагрузки Q конус 2 вдавливаются в массив грунта, совершая обкатывание внутри вырабатываемого котлована 3.

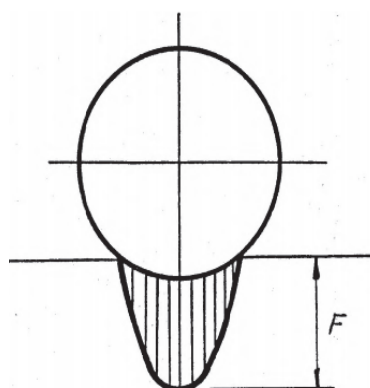


Рис. 3. Схема уплотнения грунта гладким металлическим вальцом

Основным рабочим органом машин для конусной раскатки дорожно-строительных материалов являются катки с переменным диаметром по высоте. При качении катка он воздействует на уплотняемую поверхность в узкой зоне, в центре которой сжимающее усилие F будет максимальным, а по краям этой зоны оно уменьшается до нуля. График изменения усилия под катком в первом приближении имеет вид половины синусоиды (рис. 3) [14–16].

При движении каток периодически прокатывается через одно и то же место с частотой f (и с угловой частотой $\omega = 2\pi f$). Зависимость изменения усилия от времени в этом случае представлена на рис. 4.

На рис. 4 закон изменения усилия $f(t)$ имеет вид импульсов продолжительностью τ с максимальным значением F и с периодом $T = \frac{2\pi}{\omega}$.

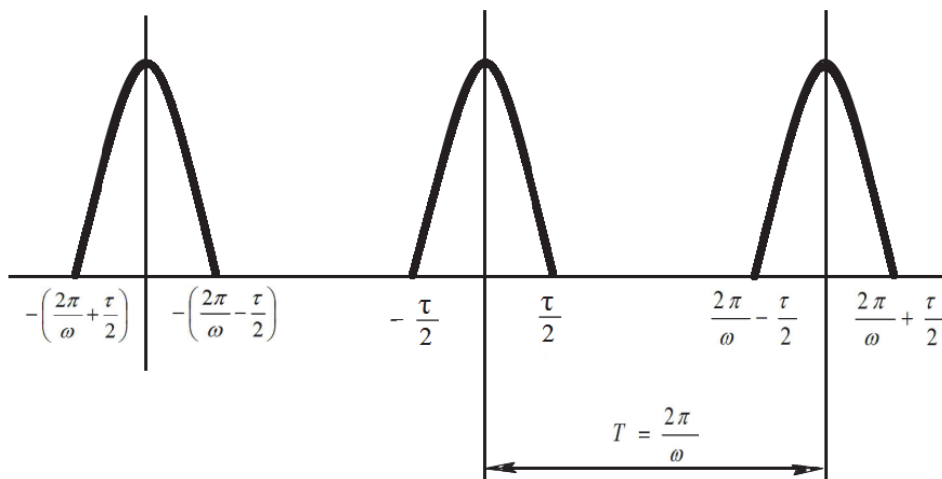


Рис. 4. График зависимости изменения усилия от времени при укатывании катка

Аналитически функцию $f(t)$ можно записать следующим образом:

$$f(t) = \begin{cases} F \cos \frac{\pi}{\tau} \left(t + \frac{2\pi}{\omega} \right), & -\frac{2\pi}{\omega} < t < \frac{2\pi}{\omega} + \frac{\tau}{2} \\ F \cos \frac{\pi}{\tau} t, & -\frac{\tau}{2} < t < \frac{\tau}{2} \\ F \cos \frac{\pi}{\tau} \left(t - \frac{2\pi}{\omega} \right), & \frac{2\pi}{\omega} - \frac{\tau}{2} < t < \frac{2\pi}{\omega} \end{cases} \quad (1)$$

Разложим функцию $f(t)$ в ряд Фурье:

$$f(t) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k \cos k\omega t, \quad (2)$$

где

$$a_k = \frac{\omega}{2\pi} \int_{-\frac{2\pi}{\omega}}^{\frac{2\pi}{\omega}} f(t) \cos k\omega t dt \quad (3)$$

Представим интеграл в формуле (3) в виде суммы интегралов:

$$a_k = \frac{\omega}{2\pi} \left[\int_{-\frac{2\pi}{\omega} + \frac{\tau}{2}}^{\frac{2\pi}{\omega} + \frac{\tau}{2}} f(t) \cos k\omega t dt + \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} f(t) \cos k\omega t dt + \int_{\frac{2\pi}{\omega} - \frac{\tau}{2}}^{\frac{2\pi}{\omega}} f(t) \cos k\omega t dt \right] \quad (4)$$

Здесь учтено, что $f(t) = 0$ в промежутках между импульсами. Подставив представление $f(t)$ по формулам (1) в (4) и проведя соответствующие вычисления, получим выражение для вычисления коэффициентов a_k :

$$a_k = \frac{4F\tau\omega}{\pi}; \quad (5)$$

$$a_{ki} = \frac{2F\omega}{\tau} \left[1 + (-1)^k \right] \frac{\cos \frac{k\omega\tau}{2}}{\left(\frac{\pi}{\tau}\right)^2 - (k\omega)^2}, k_i = 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

Таким образом, если при укатывании каток периодически прокатывается через одно и то же место с частотой $f = \frac{\omega}{2\pi}$, то это равносильно тому, что на «это место» действует постоянная сила (5) и сумма гармонических сил с амплитудами (6).

Следовательно, периодическое укатывание катком обладает тем преимуществом, что, во-первых, воздействует на малую площадь укатываемого материала, а во-вторых, воздействует на этот материал при помощи поличастотной вибрации, которая, как известно, уменьшает внешнее и внутреннее трение в материале [17–19].

Конструкция нового рабочего органа может быть выполнена в виде одного конического катка (см. рис. 2) либо в виде нескольких катков (рис. 5), что значительно упрощает динамическое уравновешение механической системы.

Новые рабочие органы могут быть установлены на экскаваторах вместо ковшей (рис. 6) или на буровых машинах.

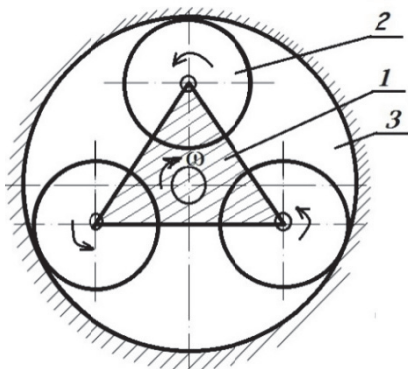


Рис. 5. Схема раскатки котлована при помощи трех катков: 1 – ведущее звено; 2 – каток; 3 – котлован



Рис. 6. Конусный раскатчик на базе гидравлического гусеничного экскаватора: 1 – рабочий орган; 2 – гидромотор; 3 – траверса

Обкатка коническим катком эквивалентна действию статической нагрузки в виде силы сжатия и вибрационного воздействия на уплотняемый грунт.

Как показывает опыт новосибирских исследователей [12], эффективная зона уплотнения грунта в горизонтальном направлении составляет около двух радиусов внедряемого рабочего органа в виде конуса, поэтому межцентровое расстояние между соседними котлованами может быть равно двум диаметрам основания конусного рабочего органа.

Ранее было показано, что мощность привода раскатчика определяется зависимостью [20]

$$N = M \cdot \omega = M \frac{n\pi}{30},$$

Расчет и конструирование

где M – требуемый крутящий момент, ω – угловая скорость, n – число оборотов коленчатого вала (водила) в минуту.

$$M = 0,266 \cdot Q \cdot 1,55 \sqrt{1 - \frac{\sigma^2}{E} \tan \frac{\alpha}{2}},$$

где Q – внешняя сила, приложенная к вертикальной оси водила, E – модуль упругости уплотняемого материала, σ – коэффициент Пуассона, α – угол оси прецессирующего вала.

Заключение

1. Предложена конструкция нового рабочего органа экскаватора, отличающаяся от известного агрегата для глубокого трамбования грунта (г. Новосибирск) значительно меньшей контактной поверхностью и создающая условия для непрерывного выхода воздуха из массива грунта.

2. Раскатчик котлована обладает тем преимуществом, что, во-первых, воздействует на малую площадь укатываемого материала, а во-вторых, воздействует на этот материал при помощи поличастотной вибрации, которая, как указано выше, уменьшает внешнее и внутреннее трение в материале.

3. Рабочий орган в виде конического раскатчика может быть установлен на дорожно-строительные машины, например, на базе серийно выпускаемых гидравлических экскаваторов или бульдозеров меньшей общей массы и меньшей установленной мощности.

Литература

1. *Дорожные катки: развитие, конструкция, расчет: учеб. пособие / под общ. ред. В.И. Боловнева, С.Н. Иванченко. – Хабаровск: ТОГУ, 2016. – 215 с.*

2. *Минаев, О.П. Основы и методы уплотнения грунтов оснований для возведения зданий и сооружений / О.П. Минаев. – СПб., 2014. – 295 с.*

3. *Луцкий, С.Я. Интенсивная технология упрочнения слабых оснований земляного полотна / С.Я. Луцкий, А.Б. Сакун // Транспортное строительство. – 2015. – № 08. – С. 18–22.*

4. *Method of increasing the roughness of the existing road / O. Skrypchenko, K. Katerina, K. Tetiana, A. Bieliatynskiy // 15th International scientific conference “Underground Urbanisation as a Prerequisite for Sustainable Development”. – 2016. – No. 165. – P. 1766–1770. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.920*

5. *Dynamic soil compaction – recent methods and research tools for innovative heavy equipment approach / P. Holger, B. Marco, K. Alexander et al. // The 5th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum (EACEF-5). – 2015. – No. 125. – P. 390–396. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.11.096*

6. *Minaev, O.P. Russian methods and equipment for spatial vibrocompaction foundations and structures / O.P. Minaev // 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ARC 2015: New Innovations and Sustainability. – 2015. – P. 2747–2750. DOI: 10.3208/jgssp.TC305-11*

7. *Methodology of ensuring road traffic safety with respect to road-building materials compaction efficiency factor / N. Sergei, K. Viktor, R. Sergei, M. Sergei // 12th International Conference “Organization and Traffic Safety Management in Large Cities”, SPbOTSIC-2016. – 2016. – P. 28–30. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.01.073*

8. *Massarsch, K.R. Deep vibratory compaction of granular soils / K.R. Massarsch, B.H. Fellenius // Chapter 19 in Ground Improvement-Case Histories, Elsevier publishers, 2005. – P. 633–658.*

9. *Evaluation of the dynamic cone penetrometer to detect compaction in ripped soils / C.T.S. Beckett, S. Bewsher, A.L. Guzzomi et al. // Soil and Tillage Research. – 2018. – No. 175. – P. 150–157. DOI: 10.1016/j.still.2017.09.009*

10. *Барац, Н.И. Механика грунтов: учеб. пособие / Н.И. Барац. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2008. – 106 с.*

11. *Криворотов, А.П. Эффективность уплотнения слабых грунтов методом раскатки скважин / А.П. Криворотов, А.В. Лубягин // Изв. вузов. Строительство. – 2006. – № 5. – С. 59–65.*

12. *Технология и оборудование для глубокого трамбования грунта / В.С. Миронов, П.Я. Фадеев, В.Я. Фадеев, М.С. Мандрик // Строительные и дорожные машины. – 2015. – № 8. – С. 2–4.*

13. *Пат. № 161212 Российская Федерация. Устройство для раскатки котлованов / Е.И. Кромский, Д.Р. Каюпов, А.С. Гладченко. – № 2015141387; заявл. 29.09.2015; опубл. 10.04.2016, Бюл. № 10. – 5 с.*

14. Блехман, И.И. *Что может вибрация? О «вибрационной механике» и вибрационной технике* / И.И. Блехман. – М.: Наука, 1988. – 208 с.
15. *Evaluation of a machine to determine maximum bulk density of soils using the vibratory method* / L. Lynessa, I. E. Edwin, T. Anika, B. Robert // *Biosystems Engineering*. – 2019. – Vol. 178. – P. 109–117. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2018.11.006
16. *Advances in numerical modelling of different ground improvement techniques* / E. Heins, K.-F. Seitz, A. Chmelnizkij et al. // *Geotechnical Engineering*. – 2017. – No. 48 (3). – P. 87–94.
17. Болдырев, Г.Г. *Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса: моногр.* / Г.Г. Болдырев. – Пенза: ПГУАС, 2008. – 696 с.
18. Baidya, D.K. *Investigation of Resonant Frequency and Amplitude of Vibrating Footing Resting on a Layered Soil System* / D.K. Baidya, Krishna, G. Murali // *Geotechnical Testing Journal*. – 2001. – Vol. 24, No. 4. – P. 409–417.
19. Triantafyllidis, Th. *A simplified model for vibro compaction of granular soils* / Th. Triantafyllidis, I. Kimmig // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2019. – Vol. 122. – P. 261–273. DOI: 10.1016/j.soildyn.2018.12.008
20. *Новое сменное оборудование гидравлического экскаватора* / Е.И. Кромский, С.В. Кондаков, К.З. Тиллоев, Х.И. Кадырова // *Политехн. вестник. Серия «Инженерные исследования»*. – 2018. – № 3 (43). – С. 50–54.

Тиллоев Кудратулло Зувайдуллоевич, аспирант кафедры «Колёсные и гусеничные машины», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, kudratullo.tilloev@bk.ru.

Поступила в редакцию 12 апреля 2019 г.

DOI: 10.14529/engin190307

MATHEMATICAL MODEL OF THE WORKING PROCESS OF CONE-SHAPED ROLLER

K.Z. Tilloev, kudratullo.tilloev@bk.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The choice of the design type of sealing machines depends on many factors: the type of compacted material (soil, crushed stone, gravel, slag, rock coarse soils, asphalt concrete, concrete); the state of the soil (optimal humidity, waterlogged, watering, bulk, subsidence); the thickness of the compacted layers (layer-by-layer compaction thin layers, compaction immediately to the entire thickness of the filling to the design mark) and the working conditions of the machine (cramped working conditions, a wide range of works). The article presents the design of the unit for deep soil compaction developed by the specialists of the Institute of hydrodynamics “Siberian branch of the Russian Academy of Sciences” (SB RAS) and its design and technological branch. Based on the assessment of the advantages and disadvantages of the unit for deep compaction of the soil, a new technical solution based on a cone roller is proposed, which provides more favorable conditions for removing air from the massif of the compaction material. A mathematical model of the cone roller using the method of decomposition of the periodic function in the Fourier series, which determined the constant force and the sum of harmonic forces in the operation of the cone working body. The main working body of cone-shaped rolling machines for soil bases of roads are rollers with variable diameter in height. When rolling, the working body acts on the sealing surface in a narrow zone. The compressive force will be maximum in the center and decrease to zero at the edges of the sealing zone. The study considers the design of a physical model of a cone-shaped roller in the form of a single roller and a self-centering working body with several rollers.

Keywords: sealing materials, compaction, deep compaction, cone-shaped roller, precessing shaft.

References

1. Balovnev V.I. (Ed.), Ivanchenko S.N. (Ed.), Danilov R.G. *Dorozhnye katki: razvitie, konstrukciya, raschet: uchebnoe posobie* [Road Rollers: Development, Design, Calculation: Study Guide]. Habarovsk, 2016. 215 p.
2. Minaev O.P. *Osnovy i metody uplotneniya gruntov osnovanij dlya vozvedeniya zdaniy i sooruzhenij* [Fundamentals and Methods of Compaction of Foundation Soils for the Construction of Buildings and Structures]. St. Petersburg, 2014. 295 p.
3. Luckij S.Ya., Sakun A.B. [Intensive Hardening Technology for Weak Subgrade Bases]. *Transportnoe stroitel'stvo* [Transport Construction], 2015. no. 08/2015, pp. 18–22. (in Russ.)
4. Skrypchenko O., Katerina K., Tetiana K., Bieliatynskiy A. Method of Increasing the Roughness of the Existing road. *15th International scientific conference "Underground Urbanisation as a Prerequisite for Sustainable Development"*. 2016, vol. 165, pp. 1766–1770. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.920
5. Holger P., Marco B., Alexander K., Matteo B., Ralf T. Dynamic Soil Compaction – Recent Methods and Research Tools for Innovative Heavy Equipment Approache. *The 5th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum (EACEF-5)*. 2015, vol. 125, pp. 390–396. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.11.096
6. 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*, 2015, pp. 2747–2750. DOI: 10.3208/jgssp.TC305-11
7. Sergei N., Viktor K., Sergei R., Sergei M. Methodology of Ensuring Road Traffic Safety with Respect to Road-Building Materials Compaction Efficiency Factor. *12th International Conference "Organization and Traffic Safety Management in Large Cities", SPbOTSIC-2016*, 2016, pp. 28–30. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.01.073
8. Massarsch K.R., Fellenius B.H. Deep Vibratory Compaction of Granular Soils. Chapter 19 in *Ground Improvement-Case Histories*. Elsevier publishers, 2005, pp. 633–658.
9. Beckett C.T.S., Bewsher S., Guzzoni A.L., Lehane B.M., Fourie A.B., Riethmuller G. Evaluation of the Dynamic Cone Penetrometer to Detect Compaction in Ripped Soils. *Soil and Tillage Research*, 2018, vol. 175, pp. 150–157. DOI: 10.1016/j.still.2017.09.009
10. Barac N.I. *Mekhanika gruntov: uchebnoe posobie* [Soil Mechanics: Tutorial]. Omsk, 2008. 106 p.
11. Krivorotov A.P., Lubyagin A.V. [Efficiency of Compaction of Soft Soils by the Method of Rolling Wells]. *Izvestiya vuzov stroitel'stvo* [University Building News], 2006, no. 5, pp. 59–65.
12. Mironov V.S., Fadeev P.Ya., Fadeev V.Ya., Mandrik M.S. [Technology and Equipment for Deep Compacted Soil]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny* [Construction and Road Machines], 2015, no. 8, pp. 2–4. (in Russ.)
13. Kromskij E.I., Kayupov D.R., Gladchenko A.S. *Ustrojstvo dlya raskatki kotlovanov* [Device for rolling pits]. Patent RF 161212, no. 2015141387; decl. 29.09.2015; publ. 10.04.2016, Bul. no. 10. 5 p.
14. Blekhan I.I. *Chto mozhet vibraciya? O vibracionnoj mekhanike i vibracionnoj tekhnike* [What Can Vibration Do ? About Vibration Mechanics and Vibration Technology]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 208 p.
15. Lynessa L., Edwin I.E., Anika T., Robert B. Evaluation of a Machine to Determine Maximum Bulk Density of Soils Using the Vibratory Method. *Biosystems Engineering*, 2019, vol. 178, pp. 109–117. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2018.11.006
16. Heins E., Seitz K.-F., Chmelnizkij A., Milatz M., Grabe J. Advances in Numerical Modelling of Different Ground Improvement Techniques. *Geotechnical Engineering*, 2017, vol. 48 (3), pp. 87–94.
17. Boldyrev G.G. *Metody Opredeleniya Mekhanicheskikh Svoystv Gruntov. Sostoyanie Voprosa: monografiya* [Methods for determining the Mechanical properties of soils. Question Status]. Penza, 2008. 696 p.
18. Baidya D.K., Murali Krishna G. Investigation of Resonant Frequency and Amplitude of Vibrating Footing Resting on a Layered Soil System. *Geotechnical Testing Journal*, 2001, vol. 24, no. 4, pp. 409–417.

-
19. Triantafyllidis Th., Kimmig I. A Simplified Model for Vibro Compaction of Granular Soils. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, vol. 122, pp. 261–273. DOI: 10.1016/j.soildyn.2018.12.008
20. Kromskij E.I., Kondakov S.V., Tilloev K.Z., Kadyrova H.I. New [Hydraulic Excavator Replacement Equipment]. *Polytechnic Bulletin. Series: Engineering studies*, 2018, no. 3 (43), pp. 50–54. (in Russ.)

Received 12 April 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Тиллоев, К.З. Математическая модель процесса работы конусного раскатчика / К.З. Тиллоев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 60–67. DOI: 10.14529/engin190307

FOR CITATION

Tilloev K.Z. Mathematical Model of the Working Process of Cone-Shaped Roller. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 60–67. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin190307