УДК 624.04(075)

DOI: 10.21440/0536-1028-2021-3-60-70

Теоретическое и экспериментальное исследование процесса глубокого уплотнения грунта конусным раскатчиком

Тиллоев К. 3.1*, Кондаков С. В.1, Асфандияров М. А.1

¹ Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия *e-mail: kudratullo.tilloev@bk.ru

Реферат

Введение. Совершенствование дорожно-строительных машин и механизмов на их базе всегда обусловлено задачами, которые формируются в конкретных условиях эксплуатации этих машин. Одна из проблем строительства автомобильных дорог в сложных климатических условиях состоит в недостаточной прочности грунтового основания, что приводит при эксплуатации к деформации дорожного покрытия и к периодическим ограничениям движения автомобилей, повышению затрат на текущий ремонт. Ежегодный ремонт дорожного покрытия не решает кардинально задачу обеспечения долговременной и надежной работоспособности этих дорог. Эта проблема может быть решена модернизацией, например, рабочего органа для уплотнения грунта на базе гусеничного экскаватора.

Цель работы — разработка математической модели определения динамических характеристик эффективной конструкции конусного раскатчика для глубокого уплотнения грунтовых оснований автомобильных дорог, промышленных и гражданских объектов.

Методология исследований основывается на системном анализе базовой гусеничной машины, рабочего органа и уплотняемого грунта, на использовании математического моделирования процесса взаимодействия конусного рабочего органа с грунтом.

Достоверность результатов подтверждена сравнением результатов численного моделирования и экспериментальных исследований. Расхождение полученных результатов математического моделирования и лабораторных испытаний по крутящему моменту и мощности не превышает 7–10 %.

Выводы. Разработана методика определения динамических характеристик конусных устройств и выведены расчетные формулы для определения опрокидывающего и крутящего моментов, которые прикладываются к валу при уплотнении грунтов с различными характеристиками. Проведены экспериментальные исследования, показавшие работоспособность данного рабочего органа. Экспериментально подтверждена разработанная методика для определения динамических характеристик конусных устройств.

Ключевые слова: гусеничный экскаватор; конусный раскатчик; уплотнение грунтов; коэффициент Пуассона; коэффициент общей деформации грунта.

Введение. Применяемые в дорожном строительстве катки, трамбовки, виброплиты и т. д. при работе с различными материалами осуществляют послойное уплотнение грунта (толщина слоя 0,3–0,8 м) [1–3]. При использовании послойного уплотнения грунта часть жидкости и воздуха запрессовывается в уплотненный грунт и образуется неравномерная структура. Увеличение массы и мощности базовых машин только усугубляет это явление.

Чтобы уплотнить грунт на глубину в несколько метров требуются совершенно другие механизмы и технология уплотнения, которые успешно применяют для уплотнения основания фундаментов при строительстве зданий и сооружений [4–6].

Результаты исследований научных школ Омска и Новосибирска свидетельствуют о том, что плотность грунта при глубинном уплотнении увеличивается на 20–25 %, а несущая способность – в 1,5–2 раза. Недостатком применяемых

известных конструкций является большая площадь контактной поверхности рабочего органа с грунтом, достигающая 6 м^2 , что требует установки гидромолотов большой мощности [7, 8].

Южно-Уральский государственный университет предлагает конструкцию нового навесного оборудования к гусеничному экскаватору с использованием конусного раскатчика, при этом площадь контакта рабочего органа с грунтом уменьшается в несколько раз (рис. 1) [9–11].

Движение рабочего органа (конусный раскатчик) I осуществляется при помощи гидровращателя 2 приводом, который является гидравлической системой экскаватора, закрепленным на траверсе 3.

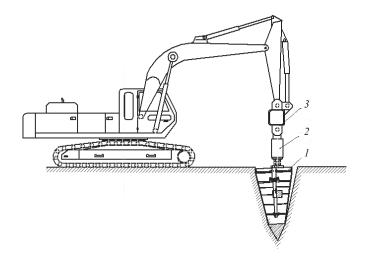


Рис. 1. Конусный раскатчик на базе гидравлического экскаватора: — конусный раскатчик; 2 — гидровращатель; 3 — траверса Fig. 1. Cone reamer based on hydraulic crawler excavator: — cone reamer; 2 — hydraulic motor; 3 — traverse

На рис. 2 изображено сечение контакта конусного устройства с образуемой скважиной, предельный зазор между корпусом раскатчика и стенкой скважины D=d+2e, где d-диаметр раскатчика; D-диаметр скважины; e-эксцентриситет коленчатого вала.

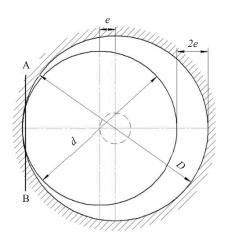
При использовании предлагаемого конусного раскатчика площадь контакта рабочего органа с грунтом уменьшается в несколько раз (длина дуги AB на рис. 2 меньше длины окружности скважины).

Методика определения динамических характеристик конусных устройств. Для определения динамических характеристик (сил, моментов и потребляемой мощности) конусных раскатывающих устройств выведем формулы для определения опрокидывающего и крутящего моментов. Опрокидывающий момент M (рис. $3, \delta$) стремится опрокинуть конусное устройство в той плоскости, в которой расположено водило. Крутящий момент представляет собой момент M_1 , который нужно приложить к водилу для его вращения.

На рис. 4 показана расчетная схема конусного устройства с углом при вершине $\alpha < \pi/2$. Коленчатый вал 2 (водило), приводящий в движение конус I, наклонен к вертикальной оси на угол $\alpha/2$. В свою очередь, при воздействии осевого усилия Q конус I внедрения в грунт 3 начинает вращаться с помощью подшипниковых опор 3, 4.

Задача сложна с математической точки зрения. Для ее решения прибегнем к ряду допущений, которые позволят получить приближенные формулы, принятые для инженерных расчетов.

Рассмотрим конус с углом при вершине α , вершина которого лежит в точке O и который своей образующей располагается на оси Oy (рис. 3, a, на рисунке конус



Puc. 2. Схема раскатки скважины (вид сверху)
Fig. 2. Scheme of the borehole reaming (top view)

условно не показан). Если через конус провести сечение плоскостью, параллельной координатной плоскости zOx и расположенной от начала координат на расстоянии y, то в сечении получим гиперболу abc. Конус вдавливается в прессуемый материал по этой гиперболе. Заменим участок гиперболы a'bc', по которому конус вдавливается в уплотняемый грунт, на часть окружности с радиусом

$$R = y \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right),\tag{1}$$

где α — угол, принимаемый в соответствии с рис. 4.

Теперь разделим конус описанными ранее сечениями на отдельные участки длиной dy. Назовем эти участки «элементарными колесами» (рис. 4) и к каждому такому

элементарному колесу применим формулы, получаемые для контактной задачи вдавливания абсолютно жесткого цилиндра в плоскость [12, 13].

Удельное усилие (рис. 3) на площадке контакта элементарного колеса с прессуемым материалом является переменным:

$$p(x) = \frac{P_{\text{max}}}{a} \sqrt{a^2 - x^2},$$
 (2)

где $P_{\rm max}$ — максимальное давление; a — половина ширины вдавливаемого конусом участка.

Максимальное давление зависит от удельной нагрузки q(y):

$$P_{\text{max}} = \frac{2q(y)}{\pi a}.$$
 (3)

В связи с тем что вдавливание конуса по всей длине образующей конуса происходит на одинаковую глубину, примем гипотезу, что $P_{\max} = const$, т. е. одинаково для любого y.

И наконец, полуширина вдавливаемого участка элементарного колеса (рис. 3) с учетом (1):

$$a = \sqrt{\frac{4R}{\pi} \frac{1 - \sigma^2}{C} q(y)} = \sqrt{\frac{4}{\pi} y tg\left(\frac{\alpha}{2}\right) \frac{1 - \sigma^2}{C} q(y)},$$
 (4)

где σ – коэффициент Пуассона; C – коэффициент общей деформации грунта, в который вдавливается конус.

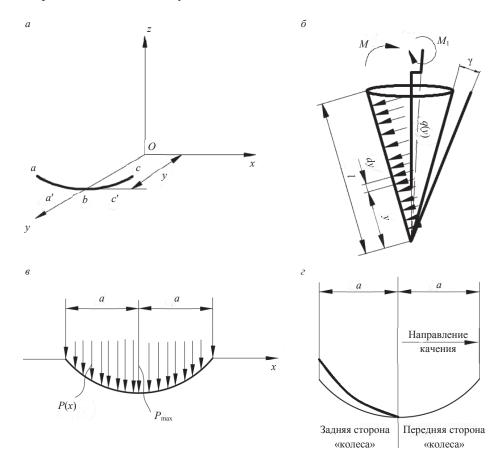


Рис. 3. Расчетные схемы:

a – кривая abc от пересечения конуса параллельной zOx; δ – эпюра давлений контактной поверхности конуса; ϵ – распрямление удельное усилие на площадки контакта; ϵ – характер действующего усилия при перекатывании конуса

Fig. 3. Calculation schemes:

a – the abc curve from the intersection of a cone with a parallel plane zOx; δ – the pressure plot of the cone contact surface; a – distribution of the specific force at the contact area; e – nature of the current force when rolling the cone

Из (3) и (4) с учетом (1) находим

$$q(y) = P_{\text{max}}^2 \pi \text{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \frac{1 - \sigma^2}{C} y.$$
 (5)

Просуммируем удельные нагрузки q(y) по длине образующей конуса l. Эта сумма должна равняться внешней силе Q, приложенной к вертикальной оси водила (рис. 4). С учетом (5) находим

$$Q = \int_{0}^{e} q(y)dy = P_{\text{max}}^{2} \pi \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \frac{1 - \sigma^{2}}{C} \frac{l^{2}}{2}.$$

Отсюда

$$P_{\text{max}} = \sqrt{\frac{Q}{\pi \text{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \frac{1 - \sigma^2}{C} \frac{l^2}{2}}}.$$
 (6)

Из (5) и (6) получаем

$$q(y) = \frac{2Q}{l^2} y.$$

И, соответственно, из (4) находим

$$a = y \sqrt{\frac{8Q}{\pi l^2} \frac{1 - \sigma^2}{C} tg\left(\frac{\alpha}{2}\right)}.$$
 (7)

Удельное усилие P(x), просуммированное на участке (-a, a), дает величину удельной нагрузки q(y) для каждого элементарного колеса. Найдем величину

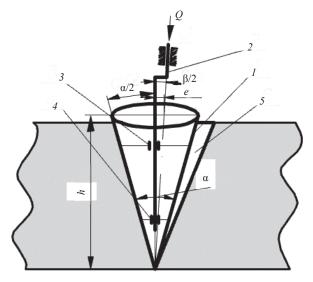


Рис. 4. Расчетная схема конусного устройства: I – конус ($\alpha < \pi/2$); 2 – коленчатый вал; 3, 4 – подшипниковые опоры; 5 – образующаяся скважина Fig. 4. Calculation scheme of the cone device: I – cone ($\alpha < \pi/2$); 2 – crankshaft; 3, 4 – bearing supports; 5 – forming well

момента M, стремящегося опрокинуть конусное устройство (рис. 3, δ). С учетом (5) и (6) находим

$$M = \int_{0}^{l} q(y)ydy = \frac{2}{3}Ql.$$

Таким образом, суммарная сила, стремящаяся опрокинуть конусное устройство, равняется внешней силе Q, приложенной на плече (2/3)l от вершины конуса.

При перекатывании элементарное колесо стремится «задней» своей половиной оторваться от прессуемого материала (рис. 3, ε). При этом на «переднюю» часть колеса действует сила, которую можно найти с помощью (2):

$$P = \int_{0}^{a} P(x)dx = \frac{P_{\text{max}}\pi a}{4}.$$

Эта сила препятствует перекатыванию элементарного колеса. Ее момент

$$M_P(y) = \int_0^a P(x)xdx = \frac{P_{\text{max}}a^2}{3}.$$

Для преодоления этого момента необходима тянущая сила, приложенная в центре элементарного колеса:

$$S(y) = \frac{M_P(y)}{R} = \frac{P_{\text{max}}a^2}{3y \text{tg}(\alpha/2)}.$$
 (8)

Эта тянущая сила создает элементарный крутящий момент, который нужно приложить к водилу, чтобы заставить катиться элементарное колесо:

$$dM_1 = S(y)ydy$$
.

И наконец, можно подсчитать суммарный крутящий момент, который нужно приложить к водилу, чтобы заставить катиться конусное устройство.

С учетом (6)–(8) находим

$$M_{1} = \int_{0}^{L} S(y) y dy = \frac{8}{9} \frac{Q}{\pi} \sqrt{\frac{2Q}{\pi} \frac{1 - \sigma^{2}}{C} \frac{1}{\text{tg}(\alpha/2)}} = 0,226 Q^{1.5} \sqrt{\frac{1 - \sigma^{2}}{C} \text{ctg}(\frac{\alpha}{2})}.$$

Теперь можно найти мощность привода, необходимую для вращения водила конусного устройства:

$$N = M_1 \omega = M_1 \frac{\pi n}{30},$$

где n — число оборотов водила в минуту, об/мин.

Выполнены экспериментальные исследования в лабораторных условиях для подтверждения достоверности полученных теоретических зависимостей, определяющих эффективность применения конусного раскатчика для глубокого уплотнения грунтов.

Для проведения экспериментальных исследований разработано и изготовлено специальное стендовое оборудование (рис. 5). Основной объем экспериментальных исследований выполнен на модели рабочего органа диаметром 0,105 м и углом при вершине конуса 24°. Исследование проводилось в искусственных грунтовых условиях нескольких видов.

Программа исследований предусматривала проведение экспериментов на следующих грунтах: $C = 1.5 \cdot 10^6 \,\text{H/m}^3$; $2.7 \cdot 10^6 \,\text{H/m}^3$ (суглинки и глины, тугопластичные); $C = 4.7 \cdot 10^6 \,\text{H/m}^3$ (супеси, твердые).

Для получения значений крутящего момента эксцентрикового вала конусного раскатчика произведен расчет привода сверлильного станка [14, 15].



Рис. 5. Экспериментальный стенд:

1 — механизм подачи; 2 — привод;

3 — коленчатый вал; 4 — конусный раскатчик;

5 — уплотняемый грунт; 6 — разборная форма
Fig. 5. Experimental stand:

1 — drive; 2 — feed mechanism; 3 — crankshaft;

4 — cone reamer; 5 — compacted soil;

6 — collapsible form

В первой серии экспериментов определена мощность электродвигателя в зависимости от величины тока, который замерен амперметром при напряжении сети 380 В и коэффициенте полезного действия электродвигателя 0,8:

$$N = I_{\text{общ}} U_{\text{сеть}} \eta_{\text{эд}}$$

где $U_{\rm сеть}$ – напряжение от сети, В; $\eta_{\rm эд}$ – КПД электродвигателя; $I_{\rm общ}$ – общий ток работающего электродвигателя, определен по формуле:

$$I_{\text{offul}} = I\sqrt{3}$$

где I – ток на одной фазе работающего электродвигателя, замеренный при проведении эксперимента, A.

Для получения значений крутящего момента на конусном устройстве показания амперметра пересчитывались последовательно через угловую скорость электродвигателя (10) — в момент электродвигателя (9), затем через передаточное число ременной передачи (11) — в момент на эксцентриковом валу (12), а затем через передаточное отношение между эксцентриковым валом и конусным раскатчиком (13) — в момент на конусном раскатчике:

$$M_{\rm kp}^{\rm AB} = \frac{N}{\omega},\tag{9}$$

где N — мощность электродвигателя, замеренная в эксперименте, B_T ; ω — угловая скорость электродвигателя, рад/с:

$$\omega_{\rm pg} = \frac{\pi n}{30},\tag{10}$$

где n — частота вращения вала электродвигателя, об/мин.

Передаточное число ременной передачи определяется по формуле

$$i = \frac{D}{d},\tag{11}$$

где D – наибольший диаметр шкива, мм; d – наименьший диаметр шкива, мм.

Угловая скорость вращения эксцентрикового вала зависит от угловой скорости электродвигателя и передаточного числа ременной передачи привода:

$$\omega_{\text{BAR}} = \frac{\omega_{\text{DA}}}{i}.$$
 (12)

Крутящий момент эксцентрикового вала определяется по формуле

$$M_{\rm kp}^{\rm 9KL} = M_{\rm kp}^{\rm JB} i \eta_{\rm pem}. \tag{13}$$

Крутящий момент конусного раскатчика измерялся как при погружении, так и при его вынимании из образующейся скважины. Это необходимо для установления соотношения этих значений и определения затрачиваемой мощности в процессе уплотнения грунта методом образования скважины. Во время извлечения конусного устройства из образующейся скважины его крутящий момент равен крутящему моменту эксцентрикового вала, поскольку конус в свободном движении вращается с эксцентриковым валом.

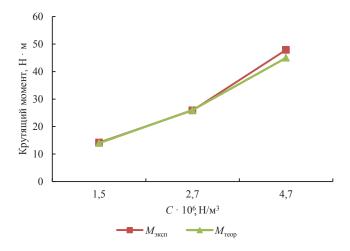


Рис. 6. Зависимость крутящего момента конусного устройства от коэффициента общей деформации грунта C Fig. 6. The dependence between the cone device torque and the coefficient of total soil deformation C

Крутящий момент конусного раскатчика зависит от крутящего момента эксцентрикового вала и передаточного отношения между эксцентриковым валом и конусным раскатчиком:

$$M_{\text{кр}}^{\text{кон}} = M_{\text{кр}}^{\text{экц}} i_{\text{кон}}^{\text{вал}},$$

где $i_{\text{кон}}^{\text{вал}}$ – передаточное отношение между валом и конусом.

Зависимость передаточного отношения между эксцентриковым валом и конусным раскатчиком определяется углом конусного раскатчика и углом нутации эксцентрикового вала:

$$i_{\text{\tiny KOH}}^{\text{\tiny BAJI}} = \frac{n_{_{\text{\tiny B}}}}{n_{_{\text{\tiny K}}}} = \frac{\omega_{_{\text{\tiny B}}}}{\omega_{_{\text{\tiny K}}}} = \frac{\sin\left(\alpha/2\right)}{\sin\beta}.$$

Угловая скорость вращения конусного устройства зависит от угловой скорости эксцентрикового вала и передаточного отношения между валом и конусом:

$$\omega_{_{\mathrm{KOH}}} = \frac{\omega_{_{\mathrm{BAJ}}}}{i_{_{\mathrm{KOH}}}^{_{\mathrm{BAJ}}}}.$$

Результаты исследований. После обработки результатов экспериментальных исследований выполнено сравнение значений крутящего момента (рис. 6), расходуемой мощности при внедрении конусного устройства в грунт (рис. 7) с теоретическими данными, полученными с помощью разработанной методики расчета и математического моделирования.

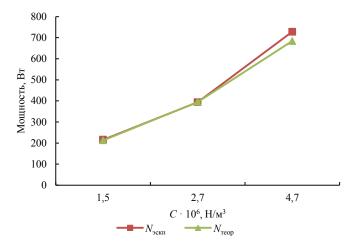


Рис. 7. Зависимость мощности конусного устройства от коэффициента общей деформации грунта C при угловой скорости $\omega=15,2$ рад/с

Fig. 7. The dependence between the cone device power and the coefficient of total soil deformation C, under the angular velocity of $\omega = 15.2 \text{ rad/s}$

Выводы. Разработан метод определения динамических характеристик конусных устройств и выведены расчетные формулы для опрокидывающего и крутящего моментов, которые нужно приложить к водилу для его вращения при уплотнении грунтов различных характеристик по показателям коэффициента общей деформации и коэффициенту Пуассона.

Сравнение теоретических и экспериментальных результатов показало, что максимальное расхождение по крутящему моменту при $C = 4.7 \cdot 10^6 \text{ H/m}^3$ и не превышает 7 %, а по мощности при $C = 1.5 \cdot 10^6 \text{ H/m}^3$ не превышает 10 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Хархута Н. Я., Васильев Ю. М. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог // Транспорт. 1975. 288 с.
- 2. Погрузочно-разгрузочные и уплотняющие машины / В. И. Баловнев [и др.]. Белгород: БГТТУ, 2011. 464 с.

- 3. Beckett C. T. S., Bewsher S., Guzzomi 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. No. 175. P. 150–157. DOI: 10.1016/j.still.2017.09.009
- 4. Пономаренко Ю. Е. Повышение эффективности устройства свайных фундаментов в уплотняемых грунтах: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Омск, 2002. 332 с.
- 5. Луцкий С. Я., Сакун А. Б. Интенсивная технология упрочнения слабых оснований земляного полотна // Транспортное строительство. 2015. № 8. С. 18–22.
- 6. Lichter J., Lim K., Potapov A., Kaja D. New developments in cone crusher performance optimization // Minerals Engineering. 2009. Vol. 22. No. 7. P. 613–617.
- 7. Minaev O. P. Russian methods and equipment for spatial vibrocompaction foundations and structures // 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, AR: New Innovations and Sustainability. 2015. P. 2747–2750. DOI: 10.3208/jgssp.TC305-11
- 8. 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.
- 9. Устройство для раскатки котлованов: пат. 161212 Рос. Федерация. № 2015141387; заявл. 29.09.2015; опубл. 10.04.2016. Бюл. № 10. 5 с.
- 10. Кромский Е. И., Кондаков С. В., Тиллоев К. З. Конусный раскатчик к гусеничному экскаватору // Вестник ЮУрГУ. Сер. «Машиностроение». 2018. Т. 18. № 1. С. 34–39. DÓI: 10.14529/ engin180104
- 11. 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). 2020. Vol. 1. P. 21–28. DOI: 10.1007/978-3-030-22041-9 3
- 12. 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. 2017. No. 170(3). P. 149–158. DOI: 10.1680/jgrim.17.00004
 - 13. Горшов А. Г., Старовойтов Э. Й. Теория упругости и пластичности. М.: Физматлит, 2002. 416 с. 14. Гулиа Н. В., Клоков В. Г., Юрков С. А. Детали машин. М.: Академия, 2014. 416 с.

 - 15. Скороходова Е. А. Общетехнический справочник. М.: Машиностроение, 2012. 416 с.

Поступила в редакцию 4 февраля 2021 года

Сведения об авторах:

Тиллоев Кудратулло Зувайдуллоевич – аспирант кафедры колесных и гусеничных машин Южно-Уральского государственного университета. E-mail: kudratullo.tilloev@bk.ru

Кондаков Сергей Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры колесных и гусеничных машин Южно-Уральского государственного университета. E-mail: tanksv@mail.ru Асфандияров Марат Андреевич – аспирант кафедры колесных и гусеничных машин Южно-Уральского государственного университета. E-mail: loko315@mail.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2021-3-60-70

Theoretical and experimental study of deep soil compaction with a cone reamer

Kudratullo Z. Tilloev¹, Sergei V. Kondakov¹, Marat A. Asfandiiarov¹

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

Abstract

Introduction. The road-building machines and mechanisms are always improved depending on the tasks formed in the specific operating conditions of these machines. One of the problems of road construction in difficult climatic conditions is the lack of ground base strength, which results in road surface deformation during operation and periodic traffic restrictions, increasing the cost of maintenance. The road surface annual repair does not fundamentally solve the problem of the roads' long-term and reliable performance. This problem can be solved by modernizing, for example, a working body for soil compaction based on a crawler excavator.

Research aim is to develop a mathematical model for determining the dynamic characteristics of a cone reamer's effective design to ensure deep compaction of soil foundations for highways and industrial and civil facilities.

Research methodology is based on a system analysis of the basic tracked vehicle, the working body, and the compacted soil. The research methods also include mathematical modeling of the cone working body interaction with the soil.

Results reliability is confirmed by comparing the results of numerical modeling and experimental studies. The discrepancy between the obtained results of mathematical modeling and laboratory tests in terms of torque and power does not exceed 7–10%.

Conclusions. A method for determining the dynamic characteristics of cone devices is developed, and calculation formulas are derived for determining the tilting moment and torque that are applied to the shaft when compacting soils with different characteristics. Experimental studies have been conducted

that have shown the efficiency of this working body. The developed method for determining the dynamic characteristics of cone devices is experimentally confirmed.

Keywords: crawler excavator; cone reamer; soil compaction; Poisson's ratio; coefficient of total soil deformation.

REFERENCES

- 1. Khartuta N. Ia., Vasiliev Iu. M. Strength, stability, and compaction of soils of the roadbed. *Transport* = *Transport*. 1975: 278. (In Russ.)
- 2. Balovnev V. I. et al. *Loading-unloading and sealing machines*. Belgorod: BSTU Publishing; 2011. (In Russ.)
- 3. Beckett C. T. S., Bewsher S., Guzzomi 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; 175: 150–157. Available from: DOI: 10.1016/j.still.2017.09.009
- 4. Ponomarenko Iu. E. *Improving the efficiency of pile foundations in compacted soils:* DSc (Engineering) thesis abstract. Omsk; 2002: 332. (In Russ.)
- 5. Lutskii S. Ia., Sakun A. B. Intensive technology of strengthening of weak foundations of the roadbed. *Transport too stroitelstvo = Transport construction*. 2015; 8: 18–22. (In Russ.)
- 6. Lichter J., Lim K., Potapov A., Kaja D. New developments in cone crusher performance optimization. *Minerals Engineering*. 2009; 22(7): 613–617.
- 7. Minaev O. P. Russian methods and equipment for spatial vibrocompaction foundations and structures. In: 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, AR: New Innovations and Sustainability. 2015. p. 2747–2750. Available from: doi: 10.3208/igssp.TC305-11
- New Innovations and Sustainability. 2015. p. 2747–2750. Available from: doi: 10.3208/jgssp.TC305-11

 8. Mironov V. S., Fadeev P. Ia., Fadeev V. Ia., Mandrik M. S. Technology and equipment for deep tamping of soil. Stroitelnye i dorozhnye mashiny = Construction and Road Building Machinery. 2015; 8: 2–4. (In Russ.)
- 9. Kromskii É. I., Kaiupov D. R., Gladchenko A. S. *The device for rolling pits*. RF Patent no. 161212; 2016.
- 10. Kromskii E. I., Kondakov S. V., Tilloev K. Z. Cone rolling to crawler excavator. *Vestnik IuUrGU. Ser. «Mashinostroenie» = Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry.* 2018; 18(1): 34–39. Available from: DOI: 10.14529 /engine 140104. (In Russ.)
- 11. Kromsky E. I., Kondakov S. V., Tilloev K. Z. Promising machine for compacting road-building materials. In: *ICIE 2019: Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2019.* 2020; 1: 21–28. Available from: DOI: 10.1007/978-3-030-22041-9_3
- 12. 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.* 2017; 170(3): 149–158. Available from: DOI: 10.1680/jgrim.17.00004
- 13. Gorshov A. G., Starovoitov E. I. *Theory of elasticity and plasticity*. Moscow: Fizmatlit Publishing; 2002. (In Russ.)
- 14. Gulia N. V., Klokov V. G., Iurkov S. A. Details of machines. Moscow: Akademiia Publishing; 2014. (In Russ.)
 - 15. Skorokhodov E. A. General technical reference. Moscow: Mashinostroenie Publishing; 2012. (In Russ.)

Received 4 February 2021

Information about authors:

Kudratullo Z. Tilloev – PhD student, Department of Wheeled and Tracked Laying Vehicles, South Ural State University. E-mail: kudratullo.tilloev@bk.ru

Sergei V. Kondakov – DSc (Engineering), Professor, Department of Wheeled and Tracked Laying Vehicles, South Ural State University. E-mail: tanksv@mail.ru

Marat A. Asfandiiarov – PhD student, Department of Wheeled and Tracked Laying Vehicles, South Ural State University. E-mail: loko315@mail.ru

Для цитирования: Тиллоев К. 3., Кондаков С. В., Асфандияров М. А. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса глубокого уплотнения грунта конусным раскатчиком // Известия вузов, Горный журнал. 2021. № 3. С. 60–70. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-3-60-70 For citation: Tilloev K. Z., Kondakov S. V., Asfandiiarov M. A. Theoretical and experimental study of deep

soil compaction with a cone reamer. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal.* 2021; 3: 60–70 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2021-3-60-70