## РАЗДЕЛ І

Научная статья УДК 624.138.22: 51-7 DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-396-416 EDN: ITFWJO



## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРАЦИОННОГО КАТКА НА ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ «РАМА-ВАЛЕЦ-ГРУНТ»

**И.С. Тюремнов** Ярославский государственный технический университет, г. Ярославль, Россия tyuremnovis@yandex.ru

## АННОТАЦИЯ

**Введение.** Вибрационные катки широко применяются для уплотнения грунтов в различных видах строительства. Технологическая эффективность вибрационных катков зависит от их технических характеристик, в том числе от частоты и вынуждающей силы колебаний, а также свойств грунта.

**Материалы и методы.** Для исследования взаимодействия элементов системы «рама-валец-грунт» разработана трёхмассная реологическая модель, позволяющая исследовать отрывные и безотрывные режимы колебаний вальца. Учет деформируемости вальца позволил сформировать более общую реологическую модель, применимую не только к гладковальцовым вибрационным каткам, но и к вибрационным каткам с гидрошинными, пневмошинными, обрезиненными и другими конструкциями деформируемых вальцов.

**Результаты.** По разработанной реологической модели был проведен вычислительный эксперимент для вибрационного катка DM-614. Значения максимальной контактной силы  $F_c^{max}$ , передаваемой вальцом на грунт, как правило, меньше значения вынуждающей силы P. При увеличении значения вынуждающей силы P и коэффициента упругого сопротивления грунта  $k_s$  значение  $F_c^{max}$  незначительно возрастает. При увеличении частоты колебаний уменьшается размах вертикальных колебаний вальца и его рамы, а также значения  $F_c^{max}$  во всём диапазоне допустимых значений  $k_s$ . Из-за нарушения симметричности осциллограммы контактной силы при переходе от режима «постоянный контакт» к режиму «частичный отрыв» с увеличением частоты колебаний вместо ожидаемого уменьшения значений времени нагружения  $t_\mu$  и разгрузки грунта  $t_\rho$  наблюдается их увеличение при определенных сочетаниях значений вынуждающей стадии (при высоких значения  $k_s$ ) целесообразно увеличение частоты колебаний не только с целью предотвращения перехода в нежелательный режим «двойной прыжок», но и для увеличения и грубину зоны уплотнения грунта.

**Обсуждение и заключение**. Результаты исследования позволяют получить не только качественное описание влияния основных динамических характеристик вибрационного катка на его технологическую эффективность, динамические нагрузки на элементы конструкции и вибробезопасность, но и дать количественную оценку этих показателей. Проведенный анализ показал, что при проектировании новых и модернизации существующих вибрационных катков необходимо учитывать реализуемый режим колебаний, что ранее не учитывалось в практике отечественного дорожно-строительного машиностроения.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** грунт, уплотнение, вибрация, каток вибрационный, моделирование реологическое, моделирование динамическое, вынуждающая сила, частота колебаний, время нагружения, время разгрузки, контактная сила

**БЛАГОДАРНОСТИ:** автор выражает благодарность д-ру техн. наук, проф. ЯГТУ Е.М. Скурыгину за консультации при разработке реологической модели. Также автор выражает благодарность редактору и рецензентам данной статьи.

Статья поступила в редакцию 01.04.2025; одобрена после рецензирования 03.06.2025; принята к публикации 16.06.2025.

© Тюремнов И.С., 2025



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

#### Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи. Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Тюремнов И.С. Исследование влияния динамических характеристик вибрационного катка на особенности взаимодействия элементов системы «рама-валец-грунт» // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 3. С. 396-416. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-396-416

Original article DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-396-416 EDN: ITFWJO

# INVESTIGATION INTO THE INFLUENCE OF VIBRATORY ROLLER DYNAMIC CHARACTERISTICS ON INTERACTION FEATURES OF FRAME-DRUM-SOIL SYSTEM ELEMENTS

Ivan S. Tyuremnov Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia tyuremnovis@yandex.ru

#### ABSTRACT

*Introduction.* Vibratory rollers are widely used for soil compaction in various types of construction. The technological efficiency of vibratory rollers depends on their technical characteristics, including the frequency and driving force of vibrations, as well as the properties of the soil.

**Materials and methods.** To study the interaction of the elements of the Frame–Drum–Soil system, a three-mass rheological model has been developed that makes it possible to study the detachable and continuous modes of oscillation of the roller. Taking into account the deformability of the drum made it possible to form a more general rheological model applicable not only to smooth-wheel vibratory rollers, but also to vibratory rollers with hydrospring, pneumatic, rubberized and other designs of deformable drums.

**Results.** According to the developed rheological model, a computational experiment was conducted for the DM-614 vibratory roller. The values of the maximum contact force  $F_c^{max}$  transmitted by the roller to the ground are usually less than the value of the driving force P. With an increase in the value of the driving force P and the coefficient of elastic resistance of the soil ks, the value of  $F_c^{max}$  increases slightly. As the oscillation frequency increases, the vertical oscillation range of the roller and its frame decreases, as well as the values of  $F_c^{max}$  over the entire range of permissible values of ks. Due to the violation of the symmetry of the contact force waveform during the transition from the "constant contact" mode to the "partial separation" mode, with an increase in the oscillation frequency, instead of the expected decrease in the loading time  $t_{\mu}$  and unloading time  $t_{p}$ , their increase is observed with certain combinations of the driving force P, the oscillation frequency f and the soil properties  $k_s$ . Therefore, when compacting the soil in the final stage (at high values of  $k_s$ ), it is advisable to increase the oscillation frequency not only to prevent the transition to an undesirable "double jump" mode, but also to increase the duration of contact stresses, which determines the depth of their propagation and the depth of the soil compaction zone.

**Discussion and conclusion.** The results of the study make it possible to obtain not only a qualitative description of the impact of the main dynamic characteristics of a vibratory roller on its technological efficiency, dynamic loads on structural elements and vibration safety, but also to quantify these indicators. The analysis showed that when designing new and upgrading existing vibratory rollers, it is necessary to take into account the implemented oscillation mode, which was not previously taken into account in the practice of domestic road construction engineering.

**KEYWORDS:** soil, compaction, vibration, vibratory roller, rheological modeling, dynamic modeling, driving force, oscillation frequency, loading time, unloading time, contact force

*The article was submitted: April 01, 2025; approved after reviewing: June 04, 2025; accepted for publication: June 16, 2025.* 

© Tyuremnov I.S., 2025



Content is available under the license Creative Commons Attribution 4.0 License.



All authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

*For citation.* Tyuremnov I.S. Investigation into the influence of vibratory roller dynamic characteristics on interaction features of Frame-Drum-Soil system elements. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2025; 22 (3): 396-416. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-396-416

### ВВЕДЕНИЕ

Вибрационные катки широко применяются для уплотнения грунтов в дорожном, промышленном, гражданском, мелиоративном и других видах строительства. На эффективность уплотнения грунта вибрационным катком влияют такие характеристики, как масса вальца, масса рамы, вынуждающая сила и частота колебаний, количество и характеристики виброизоляторов вальца, диаметр и ширина вальца, скорость движения, режим управления вибрацией и др. При этом необходимо учитывать характеристики уплотняемого грунта (вид грунта, содержание глинистых частиц, влажность, коэффициент уплотнения и др.), а также особенности объекта производства работ (требуемая глубина уплотнения и др.). С учетом широкого диапазона изменения характеристик уплотняемых грунтов и условий их уплотнения на различных объектах, задача обоснования технических характеристик вибрационных катков при их проектировании или модернизации является сложной многопараметрической задачей, не имеющей до настоящего времени своего точного решения.

Несмотря на многолетний опыт производства и эксплуатации вибрационных катков, производители до сих пор не пришли к единому мнению по обоснованию численных значений вышеприведённых характеристик катков, следствием чего является существенный разброс значений параметров, отвечающих на силовые возможности вибрационных катков (вынуждающая сила, относительная вынуждающая сила и частота колебаний) у различных моделей вибрационных катков сопоставимой массы, выпускаемых различными производителями [1, 2].

Для исследования влияния характеристик вибрационных катков на результаты уплотнения грунтов в различных условиях исследователями применяются различные методы моделирования: метод конечных элементов<sup>1</sup> [3, 4, 5], метод дискретных элементов [6, 7, 8], комбинированные методы [9]. Наибольшее распространение при исследовании влияния характеристик вибрационных катков на особенности их взаимодействия с уплотняемым грунтом получил метод реологического моделирования. Различными исследователями рассматривались одномассные реологические модели<sup>2</sup> [10, 11, 12, 13]; двухмассные реологические модели, учитывающие массы вальца и уплотняемого грунта или массы вальца и рамы катка<sup>3</sup> [14, 15, 16, 17]; трёхмассные, учитывающие массы вальца, рамы и грунта [18, 19, 20], а также различные варианты многомассных моделей<sup>4</sup> [21]. Свойства грунта в реологических моделях моделируются соединением в различных комбинациях идеализированных элементов упругого, вязкого и пластического сопротивлений, а также массой грунта, характеризующей инерционное сопротивление деформированию грунта. Реологические модели позволяют исследовать как безотрывные режимы взаимодействия вибрационного вальца с грунтом (вертикальные колебания в режиме «постоянный контакт» [14, 17, 21, 22, 23, 24], так и отрывные режимы колебаний («частичный отрыв», «двойной прыжок» и др.)<sup>5</sup> [18, 19, 25, 26, 27], представляющие наибольшую

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Erdmann P., Adam D. Numerical Simulation of Dynamic Soil Compaction with Vibratory Compaction Equipment // XV Danube - Eur. Conf. Geotech. Eng. (DECGE 2014). 2014. № 119. P. 243–248.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Дудин В.М., Попова Н.Н. Анализ расчетной схемы вибратора на упруго-вязком ограничителе // Строительные и дорожные машины: сб. научных трудов Ярославского политехнического института. Ярославль: Ярославский политехнический институт, 1975. С. 11–14.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Kaufmann K., Anderegg R. 3D-construction applications III: GPS-based compaction technology // Proc., 1st Int. Conf. Mach. Control Guid. 2008. P. 1–10.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>Чернева-Попова З. Исследование вибрации самоходного вибрационного катка ВВС/8 // Доклады первого национального конгресса по теоретической и прикладной механике. Варна, 3-6.12.1969. Книга 2. 1971. С. 119–127.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup>Adam D., Pistrol J. Dynamic roller compaction for earthworks and roller-integrated continuous compaction control : State of the art overview and recent developments // Conf. di Geotec. di Torino, XXIV Ciclio. 2016. № Ссс. Р. 1–41.

сложность, но при этом и наибольший практический интерес, поскольку наиболее эффективным режимом работы вибрационного катка является режим «частичный отрыв» [28].

Однако в РФ исследований, рассматривающих отрывные режимы колебаний вибрационных катков, к которым относятся режимы «частичный отрыв», «двойной прыжок», «раскачивания» и др., сравнительно мало. Это не позволяет отечественным производителям вибрационных катков обоснованно решать задачи повышения технического уровня и технологической эффективности выпускаемых грунтоуплотняющих машин.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для исследования взаимодействия вальца вибрационного катка с рамой и уплотняемым грунтом с учетом вынуждающей силы и частоты колебаний, характеристик установленных виброизоляторов, а также свойств грунта, была разработана трёхмассная реологическая модель, содержащая вибрационный валец массой *m*, раму массой *m*, и грунт массой т (рисунок 1). Валец связан с рамой через виброизоляторы, свойства которых моделируются параллельно установленными элементами упругого и вязкого сопротивления (схема Фойгта) с коэффициентами k, и b, соответственно. Деформации грунта также моделируются по схеме Фойгта параллельно установленными элементами упругого и вязкого сопротивления с коэффициентами, соответственно, k и *b*, показавшими хорошее воспроизведение деформативных свойств грунта при вибрационных и виброударных воздействиях [19, 29, 30]. Значение присоединенной массы грунта на основании исследований<sup>6</sup> [18] рассчитывалось как  $m_s = 0,2 \cdot m_d$ .

Одной из особенностей данной реологической модели являлось рассмотрение не абсолютно жесткого, а деформируемого вальца катка. Это не только снимает одно из допущений, используемых в большинстве работ аналогичного назначения, но и позволяет сформировать более общую модель, применимую не только к гладковальцовым вибрационным каткам, но и к вибрационным каткам с гидрошинными<sup>7</sup> [31], пневмошинными<sup>8,9</sup> [32], обрезиненными [33] и другими конструкциями деформируемых вальцов. Деформируемость рабочего органа (вальца) моделировалась элементами упругого и вязкого сопротивления с коэффициентами, соответственно, *k<sub>d</sub>* и *b<sub>d</sub>*, установленных по схеме Фойгта (см. рисунок 1).

При разработке и исследовании реологической модели были сделаны следующие допущения:

 движение элементов системы «рама-валец-грунт» рассматривается только вдоль вертикальной оси. Положительное направление оси – вниз;

 рассматривается функционирование вальца в режиме установившихся колебаний (этапы включения (разгона) и выключения (остановки) вибровозбудителя, связанные с этим переходные процессы не учитываются);

 свойства грунта в пределах одного прохода вибрационного катка не изменяются;

пластические (необратимые) деформации грунта в пределах одного прохода не учитываются. Накопление пластических деформаций в грунте после каждого прохода вибрационного катка учитывается перерасчетом характеристик грунта (коэффициентов k<sub>s</sub> и b<sub>s</sub>) к началу следующего прохода.

Реологическая модель позволяет исследовать взаимодействие вальца вибрационного катка с грунтом как в режиме контакта, так и в различных режимах периодического отрыва от грунта.

В режиме контакта с грунтом дифференциальные уравнения движения масс системы «рама-валец-грунт» (см. рисунок 1) имеют вид:



<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Tyuremnov I.S., Morev A.S., Furmanov D.V. On the justification of the value of the apparent mass of soil in rheological modeling of the process of soil compaction by a vibrating roller // J. Phys. Conf. Ser. 2019. Vol. 1260, № 11. DOI: https://doi. org/10.1088/1742-6596/1260/11/112033

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Савельев С.В. Обоснование режимных параметров вибрационного гидрошинного катка для уплотнения грунтов: специальность 05.05.04 «Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины»: автореф. дис. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук / Савельев Сергей Валерьевич. Омск, 2004. 19 с.

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Савельев С.В. Развитие теории и совершенствование конструкций вибрационных катков с пневмошинными рабочими органами: специальность 05.05.04 «Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины»: автореф. дис. на соиск. ученой степ. д-ра техн. наук / Савельев Сергей Валерьевич. Омск, 2014. 32 с.

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> Лашко А.Г. Обоснование рациональных параметров вибрационного катка с пневмошинным рабочим органом для уплотнения грунтов: специальность 05.05.04 «Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины»: дис. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук / Лашко Алексей Геннадьевич. Омск, 2012. 179 с.



Рисунок 1 – Трёхмассная реологическая модель системы «рама-валец-грунт» с деформируемым вальцом (слева – в контакте с грунтом; справа – в отрыве от грунта) Источник: составлено автором.

Figure 1 – Three-mass rheological model of the Frame–Drum–Soil system with a deformable drum (on the left – in contact with soil; on the right – separated from soil) Source: compiled by the author.

$$\begin{cases} m_{f} \cdot \ddot{x_{f}} + b_{f} \cdot (\dot{x_{f}} - \dot{x_{d}}) + k_{f} \cdot (x_{f} - x_{d}) = m_{f} \cdot g; \\ m_{d} \cdot \ddot{x_{d}} - b_{f} \cdot (\dot{x_{f}} - \dot{x_{d}}) - k_{f} \cdot (x_{f} - x_{d}) + b_{d} \cdot (\dot{x_{d}} - \dot{x_{s}}) + \\ + k_{d} \cdot (x_{d} - x_{s}) = m_{d} \cdot g + P \cdot \sin(\omega t); \\ m_{s} \cdot \ddot{x_{s}} + k_{s} \cdot x_{s} + b_{s} \cdot \dot{x_{s}} - b_{d} \cdot (\dot{x_{d}} - \dot{x_{s}}) - k_{d} \cdot (x_{d} - x_{s}) = m_{s} \cdot g \end{cases}$$
(1)

где  $\ddot{x}_{f}$  – ускорение рамы, м/с<sup>2</sup>;  $\ddot{x}_{d}$  – ускорение вальца, м/с<sup>2</sup>;  $\ddot{x}_{s}$  – ускорение грунта, м/с<sup>2</sup>;  $b_{f}$  – коэффициент вязкого сопротивления виброизоляторов, соединяющих валец с рамой, H·c/м;  $b_{d}$  – коэффициент вязкого сопротивления деформированию вальца, H·c/м;  $b_{s}$  – коэффициент вязкого сопротивления деформированию вальца, H·c/м;  $b_{s}$  – коэффициент вязкого сопротивления вальца, м/с;  $\dot{x}_{f}$  – вертикальная скорость перемещения рамы, м/с;  $\dot{x}_{d}$  – вертикальная скорость перемещения грунта, H·c/м;  $\dot{x}_{f}$  – вертикальная скорость перемещения грунта, м/с;  $k_{f}$  – коэффициент упругого сопротивления виброизоляторов, соединяющих валец и раму, H/м;  $k_{d}$  – коэффициент упругого сопротивления деформированию вальца, H/м;  $k_{s}$  – коэффициент упругого сопротивления деформированию вальца, H/м;  $k_{s}$  – коэффициент упругого сопротивления деформированию вальца, H/м;  $k_{s}$  – коэффициент упругого сопротивления деформированию вальца, M/с;  $\dot{x}_{d}$  – вертикальная координата рамы, м;  $x_{d}$  – вертикальная координата рамы, м;  $x_{d}$  – вертикальная координата грунта, M/с; P – вынуждающая сила, H;  $\omega$  – угловая скорость вибровозбудителя, рад/с.

В режиме отрыва от грунта дифференциальные уравнения движения масс системы «рама-валец-грунт» имеют вид:

$$\begin{cases} m_f \cdot \ddot{x_f} + b_f \cdot (\dot{x_f} - \dot{x_d}) + k_f \cdot (x_f - x_d) = m_f \cdot g; \\ m_d \cdot \ddot{x_d} - b_f \cdot (\dot{x_f} - \dot{x_d}) - k_f \cdot (x_f - x_d) = m_d \cdot g + P \cdot \sin(\omega t); \\ m_s \cdot \ddot{x_s} + k_s \cdot x_s + b_s \cdot \dot{x_s} = m_s \cdot g. \end{cases}$$
(2)

Контактная сила (сила реакции грунта на валец) определяется из 3-го уравнения системы (1) (см. рисунок 1):



$$m_{s} \cdot \ddot{x}_{s} + k_{s} \cdot x_{s} + b_{s} \cdot \dot{x}_{s} - b_{d} \cdot \cdot (\dot{x}_{d} - \dot{x}_{s}) - k_{d} \cdot (x_{d} - x_{s}) = m_{s} \cdot g.$$
(3)

Откуда

$$F_c = b_d \cdot (\dot{x}_d - \dot{x}_s) + k_d \cdot (x_d - x_s) =$$
  
=  $m_s \cdot \ddot{x}_s + k_s \cdot x_s + b_s \cdot \dot{x}_s - m_s \cdot g.$  (4)

Условие неприлипания грунта к вальцу:

$$F_{\rm c} \le 0. \tag{5}$$

В режиме контакта с грунтом *F*<sub>c</sub> ≤ 0. В режиме отрыва от грунта *F*<sub>c</sub> = 0.

Переход от режима отрыва от грунта (системе уравнений (2)) к режиму контакта с грунтом (системе уравнений (1)) осуществляется по условию:

$$x_d \ge x_s. \tag{6}$$

Для численного решения уравнений (1), (2) с учетом смены режимов контакта и отрыва от грунта была разработана расчетная модель в среде MATLAB Simulink.

Для верификации разработанной реологической модели системы «рама-валец-грунт» с деформируемым вальцом были проведены расчеты по разработанной реологической модели для вибрационных катков DM-614 и DM-617 в сравнении с экспериментальными данными, показавшими хорошее соответствие расчетных значений размаха вертикальных перемещений и ускорений вальца и рамы вибрационных катков DM-614 и DM-617 со значениями, полученными при экспериментальных исследованиях.

Разработанная реологическая модель воспроизводит различные режимы колебаний вальца вибрационного катка. Поскольку для вибрационных катков допускается работа лишь в режимах «постоянный контакт» и «частичный отрыв»<sup>10,11,12</sup> [11, 34], причем наиболее эффективной считается работа в конце режима «частичный отрыв» на границе перехода в режим «двойной прыжок» [28], то модель должна воспроизводить реализацию этих режимов колебаний. На рисунках 2, 3 представлены осциллограммы изменения различных характеристик тестового вибрационного катка в режимах «постоянный контакт» (см. рисунок 2) и «частичный отрыв» (см. рисунок 3). Характеристики тестового вибрационного катка: масса вальца  $m_d = 4000$  кг; масса рамы вальца  $m_f = 4000$  кг; масса присоединенного грунта  $m_f = 200$  кг; частота колебаний f = 30 Гц; вынуждающая сила P = 270 кН; коэффициент упругого сопротивления амортизаторов рамы  $k_f = 9,74$  МН/м; коэффициент вязкого сопротивления амортизаторов рамы  $b_f = 26$  кH·с/м; коэффициент упругого сопротивления деформированию вальца  $k_d = 5000$  МН/м; коэффициент вязкого сопротивления деформированию вальца  $b_d = 2000$  кH·с/м.

Значение коэффициента упругого сопротивления грунта рассчитывалось на основании анализа работ аналогичного назначения и исследований автора в зависимости от значений динамического модуля деформации грунта ( $E_{vd}$ , МПа), определявшегося в экспериментальных исследованиях, по формуле  $k_s = 2,7 \cdot E_{vd}$  (для песчаных грунтов). Значение коэффициента вязкого сопротивления грунта принималось постоянным и равным  $b_s = 200 \text{ кH} \cdot \text{с/m}$  (для песчаных грунтов) на основании допущения об определяющем влиянии на значения  $b_s$  вида и влажности грунта, которые в процессе моделирования принимались неизменными.

На рисунках 2, 3 представлены некоторые результаты графического отображения (в виде осциллограмм) особенностей колебаний различных элементов системы «рама-валец-грунт».

На всех осциллограммах ось абсцисс – время (в секундах). Для исключения влияния переходных режимов при разгоне вибровозбудителя и стабилизации колебаний, все осциллограммы приведены для интервала времени 9,5...10 сек после начала моделирования, когда все переходные процессы завершаются.

На всех осциллограммах ось абсцисс – время (в секундах). Для исключения влияния переходных режимов при разгоне вибровозбудителя и стабилизации колебаний, все осциллограммы приведены для интервала времени 9,5...10 сек после начала моделирования, когда все переходные процессы завершаются.



<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> Машины для дорожного строительства САТ. Руководство по уплотнению грунта. QRBQ 1705. Caterpillar Inc., 2013. 132 с.

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> Уплотнение асфальтобетона и грунта. НАММ АG 03.2011 212 4832 / изд. 2-е. 2011. 142 с.

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup>Adam D., Pistrol J. Dynamic roller compaction for earthworks and roller-integrated continuous compaction control : State of the art overview and recent developments // Conf. di Geotec. di Torino, XXIV Ciclio. 2016. № Ссс. Р. 1–41.



Рисунок 2 – Осциллограммы колебаний различных элементов тестового вибрационного катка при k<sub>s</sub> = 20 МН/м (режим «постоянный контакт») Источник: составлено автором.

Figure 2 – Vibration oscillograms for various elements of the test vibratory roller at  $k_s = 20 \text{ MN/m}$  ("constant contact" mode) Source: compiled by the author.

Осциллограмма «Xd, Xs» (см. рисунки 2, 3) отображает изменение во времени вертикальных координат вальца  $x_d$  (в метрах, чёрная линия на рисунке 3) и грунта х (в метрах, розовая линия на рисунках 2, 3). В безотрывном режиме колебаний вальца (режим «постоянный контакт», при котором в каждом цикле колебаний валец не отрывается от грунта<sup>13</sup>) вертикальные координаты вальца и грунта практически совпадают и на осциллограмме отображается только одна линия - координата грунта (линия розового цвета). В режимах отрывных колебаний, например в режиме «частичный отрыв», характеризующемся периодическим отрывом вальца от грунта, в каждом цикле колебаний, на фазе отрыва вертикальные координаты вальца и грунта различаются (см. рисунок 3). Поскольку координатная ось направлена сверху вниз, то отрыв вальца от грунта соответствует отрицательным значениям вертикальной координаты вальца, а совместное движение вальца с грунтом – положительным значениям координат вальца и грунта.

Осциллограмма «*F*<sub>c</sub><0» отображает изменение контактной силы *F*<sub>c</sub> (силы реакции грунта (4), в Ньютонах). Отрицательное значение контактной силы соответствует направлению её действия снизу вверх или от грунта на валец (т.е. противоположно направлению вертикальной оси, направленной сверху вниз).

Осциллограммы «Xf» и «X"f» и отображают, соответственно, изменение вертикальных перемещений *x<sub>f</sub>* рамы вибрационного катка (в метрах) и вертикальных ускорений рамы  $\ddot{x}_{\epsilon}$  (м/c2).

Осциллограмма «U2» отображает изменение значение условия (6), характеризующего наличие контакта между вальцом и грунтом (при контакте U2 = 1, при отрыве U2 = 0).

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> Тюремнов И.С. Моделирование отображения различных режимов колебаний вальца системами непрерывного контроля уплотнения грунта вибрационными катками / И.С. Тюремнов, А.С. Морев // Пром-Инжиниринг: труды VII всероссийской научно-технической конференции, Москва, Челябинск, Новочеркасск, Волгоград, Сочи, 17–21 мая 2021 года. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2021. С. 38-42. https://elibrary.ru/download/elibrary\_48007845\_57225778.pdf



### PART I



Рисунок 3 – Осциллограммы колебаний различных элементов тестового вибрационного катка с P = 270 кН при k<sub>s</sub> = 80 МН/м (режим «частичный отрыв») Источник: составлено автором.

Figure 3 – Vibration oscillograms for various elements of the test vibratory roller with P = 270 kN at  $k_s = 80 \text{ MN/m}$  ("partial uplift" mode) Source: compiled by the author.

На представленных на рисунках 2, 3 осциллограммах можно наблюдать характерные особенности реализации режимов колебаний «постоянный контакт» и «частичный отрыв». Для режима колебаний «постоянный контакт» (см. рисунок 2) характерными являются:

 отсутствие отрыва вальца от грунта и ненулевое значение контактной силы *F* в течение всего времени внутри каждого цикла колебаний;

равенство в смежных циклах колебаний значений амплитуд колебаний вальца *x<sub>d</sub>*,
 рамы *x<sub>p</sub>*, а также максимального значения контактной силы *F<sub>c</sub>*<sup>max</sup>;

- симметричный вид осциллограммы контактной силы *F*<sub>c</sub> (продолжительность на-гружения равна продолжительности разгрузки, т.е. *t*<sub>u</sub> = *t*<sub>b</sub>).

Для режима колебаний «частичный отрыв» (см. рисунок 3) характерно:

- наличие отрыва вальца от грунта и достижение контактной силой *F*<sub>с</sub> нулевого значения в течение некоторого времени внутри каждого цикла колебаний;

равенство в смежных циклах колебаний значений амплитуд колебаний вальца *x<sub>a</sub>*,
 рамы *x<sub>p</sub>*, а также максимального значения контактной силы *F<sub>c</sub>*<sup>max</sup>;

асимметричный вид осциллограммы контактной силы *F*<sub>c</sub> (продолжительность на-гружения меньше продолжительности разгрузки, т.е. *t*<sub>µ</sub> < *t*<sub>p</sub>).

#### РЕЗУЛЬТАТЫ

С использованием разработанной трёхмассной реологической модели системы «рама-валец-грунт» с деформируемым вальцом было проведено исследование влияния различных характеристик грунтовых вибрационных катков и свойств грунта на особенности взаимодействия вальца катка с рамой и с уплотняемым грунтом. Задачей исследований являлось изучение влияния вынуждающей силы, частоты колебаний и свойств грунта на характеристики колебаний вальца и рамы вибрационного катка, максимальное значение контактной силы и составляющие времени воздействия на грунт вибрационным катком DM-614, имеющие важное значение для определения результатов уплотнения грунта вибрационным катком в рамках разработанной методологии определения влияния технических характеристик на технологические возможности вибрационных катков [35].

Таблица 1

Параметры вычислительного эксперимента по исследованию влияния характеристик катка и грунта на особенности взаимодействия с грунтом вибрационного катка DM-614 Источник: составлено авторами.

Table 1

Parameters of a computational experiment to study the effect of roller and ground characteristics on the interaction between the soil and a DM-614 vibratory roller Source: compiled by the author.

Параметр	Значения			
Вынуждающая сила <i>Р</i> , кН	200	250	300	350
Частота колебаний <i>f</i> , Гц	20	30	40	50
Коэффициент упругого сопротивления грунта $k_{ m s}^{},{ m MH/}{ m M}$	30	70	110	150

Для исследования был взят гладковальцовый вибрационный грунтовый каток модели DM-614 производства ООО «Завод «Дорожных машин»» (г. Рыбинск, Ярославская область) с характеристиками: эксплуатационная масса 14 000 кг, масса вибрационного вальца  $m_d = 4 041$  кг, масса рамы вальца  $m_f = 3 659$  кг, частота колебаний вибровозбудителя f = 30 Гц, вынуждающая сила P = 230 кН, применяемые виброизоляторы – GMT 58200715 (20 штук).

На основании результатов, проведенных на кафедре «Строительные и дорожные машины» ЯГТУ экспериментальных исследований динамических характеристик амортизаторов GMT 58200715 (частично представленных в работах<sup>14,15</sup>), значение коэффициента упругого сопротивления одного виброизолятора GMT 58200715 принималось равным  $k_f = 0,487$  MH/м, а значение коэффициента вязкого сопротивления  $b_f = 1,3$  кH·с/м. Таким образом, для 20 виброизоляторов GMT 58200715 значения  $k_f$  и  $b_f$  составили соответственно:  $k_c = 9,74$  MH/м и  $b_c = 26$  кH·c/м.

По разработанной трёхмассной реологической модели с деформируемым рабочим органом был проведен полнофакторный вычислительный эксперимент с параметрами и диапазонами их изменения, представленными в таблице 1. Диапазон изменения k<sub>s</sub> = 30...150 МН/м соответствует диапазону изменения коэффициента уплотнения песчаных грунтов K<sub>v</sub> ≈ 0,88...1,01.

Для каждого сочетания параметров (см. таблицу 1) формировались осциллограммы изменения во времени различных параметров катка и по ним определялись: максимальное значение контактной силы Е. тах, продолжительность нагружения грунта t<sub>н</sub>, продолжительность разгрузки грунта t<sub>в</sub>, а также размах колебаний вальца х<sub>а</sub> и рамы х<sub>г</sub>. Одновременно определялся режим колебаний вальца. С учетом недопущения реализации вибрационным катком режима «двойной прыжок» [28], для каждого сочетания параметров определялось критическое значение  $k^*_{\ 
m s}$ , при котором возникает режим «двойной прыжок». То есть рассматривались только такие сочетания параметров вибрационного катка и грунта, при которых колебания осуществлялись в режимах «постоянный контакт» или «частичный отрыв».

Графические представления результатов вычислительного эксперимента представлены на рисунках 4, 5, 6, 7, 8, 9.

Полученные по осциллограммам значения  $t_{\mu}$ ,  $t_{\mu}$  и  $F_{c}^{max}$  сводились в таблицу для последующей обработки программе STATISTICA и получения регрессионных зависимостей (таблица 2).

<sup>&</sup>lt;sup>15</sup> Тюремнов А.И., Тихонов Д.Н., Шорохов Д.А. Некоторые особенности экспериментального определения значений коэффициента вязкого сопротивления амортизаторов вальца вибрационных катков // 100 лет кафедре «Наземные транспортно-технологические средства»: история становления, основные направления научной деятельности, перспективы развития: материалы Всероссийской научно-практической конференции, Москва, 25 октября 2024 года. Курск: ЗАО «Университетская книга», 2024. С. 156–161. https://elibrary.ru/download/elibrary\_75173659\_56191689.pdf



<sup>&</sup>lt;sup>14</sup> Тихонов Д.Н., Тюремнов А.И., Шорохов Д.А. К вопросу экспериментального определения значений коэффициентов вязкого сопротивления и динамической жесткости амортизаторов вальца вибрационных катков // XVIII Ежегодная научная сессия аспирантов и молодых ученых: материалы Всероссийской научной конференции (с международным участием), Вологда, 25–29 ноября 2024 года. Вологда: ВоГУ, 2025. С. 849–852.



Рисунок 4 – Значения максимальной контактной силы F<sup>max</sup> катка DM-614 при значениях вынуждающей силы: а – 200 кН; б – 250 кН; в – 500 кН; г – 350 кН Источник: составлено автором.

Figure 4 – The values of the maximum contact force  $F_c^{max}$  of the DM-614 roller for the driving force values: a - 200 kN; b - 250 kN; c - 300 kN; d - 350 kNSource: compiled by the author.

РАЗДЕЛ І



Рисунок 5 – Значения продолжительности нагружения грунта t<sub>и</sub> катком DM-614 при значениях вынуждающей силы: а – 200 кН; б – 250 кН; в – 300 кН; г – 350 кН Источник: составлено автором.

Figure 5 – The values of soil loading duration  $t_{\mu}$  for the DM-614 roller with the driving force values: a - 200 kN; b - 250 kN; c - 300 kN; d - 350 kNSource: compiled by the author.

PART I



Рисунок 6 – Значения продолжительности разгрузки грунта t<sub>p</sub> катком DM-614 при значениях вынуждающей силы: а – 200 кН; б – 250 кН; в – 300 кН; г – 350 кН Источник: составлено автором.

Figure 6 – The values of soil unloading duration  $t_p$  by DM-614 roller with the driving force values: a - 200 kN; b - 250 kN; c - 300 kN; d - 350 kNSource: compiled by the author.

РАЗДЕЛ І



Рисунок 7 — Значения размаха х<sub>а</sub> колебаний вальца катка DM-614 при значениях вынуждающей силы: а –200 кН; б – 250 кН; е – 300 кН; г – 350 кН Источник: составлено автором.

Figure 7 – The values of the double amplitude  $x_d$  of the DM-614 drum for the driving force values: a - 200 kN; b - 250 kN; c - 300 kN; d - 350 kNSource: compiled by the author.



Рисунок 8 – Значения размаха х, колебаний рамы катка DM-614 при значениях вынуждающей силы: а – 200 кН; б – 250 кН; в – 300 кН; г – 350 кН Источник: составлено автором.

Figure 8 – The values of the double amplitude  $x_r$  of the roller frame DM-614 for the driving force values: a - 200 kN; b - 250 kN; c - 300 kN; d - 350 kNSource: compiled by the author.



Рисунок 9 – Влияние частоты f и вынуждающей силы P колебаний вальца вибрационного катка DM-614 на значения k\*s, при которых возникает режим «двойной прыжок» Источник: составлено автором.

> Figure 9 – The effect of the frequency f and the driving force P of the DM-614 vibratory roller drum on the k\*s values at which the "double jump" mode occurs Source: compiled by the author.

В таблице 2 применяются следующие единицы измерения параметров:  $t_{\mu}$ , мс;  $t_{\rho}$ , мс;  $F_{c}^{max}$ , кH; *P*, кH; *f*, Гц;  $k_{s}^{*}$ , МН/м.

#### Таблица 2

Регрессионные зависимости для расчета значений  $t_{\mu}$ ,  $t_{\rho}$  и  $F_{c}^{max}$  при взаимодействии вибрационного катка DM-614 с грунтом Источник: составлено автором.

Table 2

Regression dependencies for calculating the values of  $t_{\mu}$ ,  $t_{\rho}$  and  $F_{c}^{max}$ during the interaction of the DM-614 vibratory roller with the soil Source: compiled by the author.

Nº	Вид зависимости	Значение <i>R</i>
1	$t_{\mu} = -30,667 + 282,98 \cdot P^{-0.01085} \cdot f^{0.008468} \cdot k_s^{-0.05908} - 65,096 \cdot f^{-0.7822} - 220,53 \cdot k_s^{-0.07975}$	0,7459
2	$t_p = 7,7413 + 39748 \cdot P^{-0.6597} \cdot f^{-0.6951} \cdot k_s^{-0.8086}$	0,8744
3	$F_c^{\max} = 105,3 + 85,44 \cdot P^{0,7991} \cdot f^{-2,396} \cdot k^{\circ 0,8598}$	0,976
4	$k_s^* = -428, 3+634, 4 \cdot P^{-0.2038} \cdot f^{0.2777}$	0,9205

#### ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов вычислительного эксперимента (см. рисунки 4, 5, 6, 7, 8, 9 и таблицу 2) показывает, что главные динамические характеристики вибрационного катка, в качестве которых выступают вынуждающая сила и частота колебаний, сложным образом влияют на особенности взаимодействия вибрационного катка DM-614 с грунтом.

В соответствии с разработанной методологией определения влияния технических характеристик вибрационных катков на результаты уплотнения грунта [35] деформация приповерхностных слоев грунта, а следовательно, и коэффициент уплотнения на поверхности грунта, преимущественно определяются значениями амплитудных контактных напряжений σ<sub>0</sub>, которые, в свою очередь, будут определяться значением максимальной контактной силы  $F_{c}^{max}$  (см. рисунок 4). Глубина же распространения напряжений, а значит и глубина уплотнения, будет зависеть от продолжительности действия соответствующих значений напряжений на поверхности грунта. При этом необходимо учитывать дополнительные ограничения в виде недопущения перехода колебаний вальца катка в режим «двойной прыжок», а также недопущения чрезмерно высоких амплитуд колебаний вальца и рамы катка.

Значения максимальной контактной силы  $F_c^{max}$ , передаваемой вальцом на грунт, как правило, не совпадают со значением вынуждающей силы P, генерируемой вибровозбудителем катка. В большинстве случаев наблюдается ситуация, когда  $F_c^{max} < P$  (см. рисунок 4). При увеличении значения вынуждающей силы P значение контактной силы  $F_c^{max}$  возрастает, но в меньшей степени (при увеличении вынуждающей силы с 200 до 350 кН (т.е., в 1,75 раза) значение контактной силы увеличивается в 1,14...1,3 раза (в зависимости от частоты колебаний и характеристик грунта).

Частота колебаний оказывает существенное влияние на значения  $F_c^{max}$ . Влияние частоты колебаний на значения  $F_c^{max}$ ,  $x_d$  и другие параметры системы «рама-валец-грунт» не ограничиваются околорезонансными эффектами, а носят более сложный характер, требующий отдельного исследования, выходящего за рамки данной статьи. При частоте 20 Гц наблюдается наибольший размах колебаний вальца, что приводит к переходу колебаний в недопустимый режим «двойного прыжка» и резко ограничивает диапазон значений  $k_s$ для работы катка (см. рисунок 4), позволяя работать на частоте 20 Гц лишь в начальной стадии уплотнения. При увеличении частоты колебаний уменьшаются значения размаха вертикальных колебаний вальца и его рамы (см. рисунки 7, 8), а также значения контактной силы  $F_{c}^{max}$  (см. рисунок 4) во всём диапазоне допустимых значений k. Сам же диапазон значений k, при котором колебания осуществляются в безопасных режимах («постоянный контакт» и «частичный отрыв») расширяется при увеличении частоты колебаний (см. рисунок 9). Это позволяет увеличивать значение вынуждающей силы Р (и эффективность уплотнения приповерхностных слоев грунта) без перехода колебаний в нежелательный режим «двойного прыжка» за счет ограничения размаха колебаний при увеличении их частоты. Однако эффективность преобразования вынуждающей силы Р в силу, передаваемую вальцом уплотняемому грунту (контактную силу F\_max), уменьшается с увеличением частоты колебаний (см. рисунок 4).

В процессе уплотнения грунта (увеличения значения  $k_s$ ) значения контактной силы  $F_c^{\text{max}}$  незначительно возрастают. При увеличении значения  $k_s$  в 5 раз (от 30 до 150 МН/м) значения  $F_c^{\text{max}}$  увеличиваются в 1,2...1,8 раза (в зависимости от вынуждающей силы и частоты колебаний).

На глубину уплотнения грунта будет влиять продолжительность действия напряжений на поверхности грунта [36, 37], определяемая продолжительностью нагружения  $t_{\mu}$  и разгрузки  $t_{\rho}$  грунта. Значения  $t_{\mu}$  и  $t_{\rho}$  определяются не только частотой колебаний, но реализуемым режимом колебаний.

В режиме «постоянный контакт» осциллограмма контактной силы имеет симметричный вид (см. рисунок 2). Таким образом, в режиме «постоянный контакт» продолжительность нагружения и разгрузки грунта равны между собой (см. рисунки 5, 6) и определяются частотой колебаний *f*.

$$t_{_{H}} = t_{_{p}} = 1/(2f).$$

В режиме «частичный отрыв» осциллограмма контактной силы становится асимметричной (см. рисунок 3) и продолжительность нагружения будет меньше продолжительности разгрузки ( $t_{\mu} < t_{\rho}$ ). При этом вследствие периодического отрыва вальца от грунта значения  $t_{\mu}$ и  $t_{\rho}$  становятся меньше, чем при режиме «постоянный контакт» (см. рисунки 5, 6). Таким образом, в режиме «частичный отрыв»

$$t_{\mu} < 1/(2f); t_{\rho} < 1/(2f); t_{\mu} < t_{\rho}.$$



Количество проходов (время)

Рисунок 10 – Рекомендации AMMANN/CASE по изменению вынуждающей силы и частоты колебаний «интеллектуальных» вибрационных катков [11]

> Figure 10 – AMMANN/CASE recommendations on changing the driving force and frequency of «intelligent» vibratory rollers [11]

Этим объясняется наблюдаемая на рисунках 5, 6 особенность, при которой с увеличением частоты колебаний вместо ожидаемого уменьшения значений t<sub>u</sub> и t<sub>n</sub> наблюдается их увеличение при определенных сочетаниях значений вынуждающей силы Р, частоты колебаний f и свойств грунта k. При частоте колебаний 50 Гц диапазон значений к, в котором сохраняется режим «постоянный контакт» больше, чем при частотах колебаний 30 Гц и 40 Гц. Поэтому при уплотнении грунта в завершающей стадии (при высоких значениях k, и, следовательно, коэффициента уплотнения К) целесообразно увеличение частоты колебаний не только с целью предотвращения перехода в нежелательный режим «двойной прыжок» (см. рисунок 9), но и для увеличения продолжительности действия контактных напряжений, определяющих глубину их распространения и глубину зоны уплотнения грунта, что согласуется с рекомендациями одного из ведущих производителей вибрационных катков (AMMANN/CASE) по изменению режима работы «интеллектуальных» вибрационных катков в процессе уплотнения грунта [11, 36, 38, 39] (рисунок 10).

#### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В данной работе для вибрационного катка DM-614 с использованием разработанной трёхмассной реологической модели с деформируемым вальцом проведено исследование влияния вынуждающей силы и частоты колебаний на размах колебаний вальца и рамы катка, максимальное значение контактной силы, продолжительности нагружения и разгрузки грунта, а также диапазон состояний грунта, в которых колебания реализуются в безопасных режимах («постоянный контакт» и «частичный отрыв»), т.е. в котором возможно применение одной и той же машины без изменения режима вибрации («максимальная вибрация», «минимальная вибрация» или статический режим) или без перехода на другой каток.

Результаты исследования позволяют получить не только качественное описание влияния основных динамических характеристик вибрационного катка на его технологическую эффективность, динамические нагрузки на элементы конструкции и вибробезопасность, но и дать количественную оценку этих показателей. Полученные результаты позволяют конструкторам вибрационных катков решать задачи улучшения технологических возможностей и технических характеристик проектируемых машин (например, увеличивать вынуждающую силу колебаний и достигаемый коэффициент уплотнения грунта катка с заданной массой) при сохранении в требуемых диапазонах размаха колебаний вальца и рамы катка, сохранении (и даже расширении) диапазона свойств уплотняемого грунта, в которых возможно применение вибрационного катка без изменения режима вибрации или перехода на другую модель катка.

Проведенный анализ показал необходимость учета реализуемого режима колебаний при проектировании новых и модернизации существующих отечественных вибрационных катков. Реализуемый режим колебаний зависит от сочетания характеристик грунта, количества и характеристик виброизоляторов, вынуждающей силы и частоты колебаний вальца, масс вальца и его рамы, а также скорости движения катка (с учетом возможных диапазонов изменения этих параметров). В практике отечественного дорожно-строительного машиностроения в такой постановке задача ранее не ставилась, и режим колебаний не рассматривался в качестве одного из ограничений при обосновании технических характеристик вибрационных грунтовых катков при их проектировании или модернизации. Но без учета этого фактора невозможно производство отечественных вибрационных катков, не уступающих лучшим мировым образцам, в т.ч. по сочетанию вынуждающей силы и частоты колебаний при сопоставимой общей массе, что является важной составляющей процесса импортозамещения и обеспечения технологического суверенитета РФ в сфере дорожно-строительного машиностроения.

Для дальнейшего совершенствования методологии обоснования технических характеристик вибрационных грунтовых катков при их проектировании или модернизации целесообразно исследование влияния количества и характеристик виброизоляторов вальца и соотношения масс вальца и рамы на реализуемые режимы колебаний, характеристики колебаний элементов вибрационного катка, значения максимальной контактной силы, а также продолжительность нагружения и разгрузки грунта.

## список источников

1. Тюремнов И.С., Игнатьев А.А., Филатов И.С. Статистический анализ технических характеристик грунтовых вибрационных катков // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2014. № 3(34). С. 81–88. DOI: https://vestnik.pnu.edu. ru/vestnik/pub/articles/1987/

2. Тюремнов И.С. Анализ технических характеристик различных типов ударно-вибрационных грунтоуплотняющих машин // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 6(94). С. 706–716. DOI: https://doi. org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-706-716

3. Fathi A. et al. Assessing depth of influence of intelligent compaction rollers by integrating laboratory testing and field measurements // Transp. Geotech. 2021. Vol. 28. P. 100509. DOI: https://doi.org/10.1016/j. trgeo.2020.100509

4. Shen J. et al. Co-simulation for optimal working parameter selection during soil vibratory compaction process // J. Terramechanics. 2024. Vol. 112. P. 45–57. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jterra.2023.12.002

5. Li S. et al. Dynamic characteristics of subgrade-bridge transitions in heavy-haul railways under roller excitation // Transp. Geotech. 2021. Vol. 29. P. 100589. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100589

6. Wu K. et al. Discrete Element Modeling of Vibration Compaction Effect of the Vibratory Roller in Roundtrips on Gravels // J. Test. Eval. 2021. Vol. 49. P. 20190910. DOI: https://doi.org/10.1520/JTE20190910

7. Peng H. et al. Discrete element simulation of vibration compaction of slag subgrade // Sci. Rep. 2024. Vol. 14. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-024-55276-2

8. Quist J. et al. UNDERSÖKNING AV SEPARA-TIONSEFFEKTER VID KOMPAKTERING AV OBUND-NA MATERIAL. SBUF ID: 13820. 2021. 56 p.

9. Li Y., She C. Discrete Simulation of Vibratory Roller Compaction of Field Rockfills // Shock Vib. 2021. Vol. 2021. P. 1–15. DOI: https://doi. org/10.1155/2021/9246947

10. Попов Г.Н. Выбор параметров прицепных вибрационных катков для уплотнения грунтовых оснований // Тр. ЛПИ, вып. 321. 1972. С. 114–119.

11. Anderegg R., Von Felten D.A., Kaufmann K. Compaction monitoring using intelligent soil compactors // GeoCongress 2006 Geotech. Eng. Inf. Technol. Age. Atlanta, 2006. Vol. 2006, № Jönsson. P. 41.

12. Шишкин Е.А., Смоляков А.А. Обоснование способа регулирования контактного усилия вибрационного вальца с уплотняемым материалом // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 1(53). С. 36–42. DOI: https://doi.org/10.18324/2077-5415-2022-1-36-42

13. Шишкин Е.А., Смоляков А.А. Исследование спектра ускорения вибрационного вальца в процессе уплотнения грунта // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22(2). С. 182–192. DOI: https://doi. org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-182-192

14. Yoo T.-S., Selig E.T. Dynamics of Vibratory-Roller Compaction // J. Geotech. Eng. Div. ASCE. 1979. № 105 (GT10). P. 1211–1231.

15. Siminiati D., Hren D. Simulation on vibratory roller-soil interaction // Adv. Eng. 2008. Vol. 2, № 1. P. 111–120.

16. Pistrol J. et al. Consideration of the Variable Contact Geometry in Vibratory Roller Compaction // Infrastructures. 2023. Vol. 8, № 110. P. 1–15. DOI: https://doi.org/10.3390/infrastructures8070110

17. Шабанова Г.И., Савельев С.В., Бурый Г.Г. Математическое описание колебательной системы "вибрационный рабочий орган - грунт" // Вестник СибАДИ. 2013. № 3(31). С. 102–107.

18. Susante P., Mooney M. Capturing Nonlinear Vibratory Roller Compactor Behavior through Lumped Parameter Modeling // J. Eng. Mech. 1996. P. 684–693. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2008)134:8(684) 19. Шишкин Е.А., Смоляков А.А. Моделирование взаимодействия вибрационного вальца дорожного катка с уплотняемым грунтом // Транспортное, горное и строительное машиностроение наука и производство. 2024. № 26. С. 60–67. DOI: https://doi. org/10.26160/2658-3305-2024-26-60-67

20. Тюремнов И.С., Шорохов Д.А. Моделирование взаимодействия вибрационного катка с уплотняемым грунтом // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 2. С. 202–216. DOI:https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-202-216

21. Михеев В.В., Савельев С.В. Математическая модель уплотнения упруговязкопластичной грунтовой среды при взаимодействии с рабочим органом дорожной машины в рамках модифицированного подхода сосредоточенных параметров // Вестник СибАДИ. 2017. № 2(54). С. 28–36. DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-2(54)-28-36

22. Тарасов В.Н., Бояркина И.В., Серебренников В.С. Аналитический метод исследования вертикальных перемещений вибровальца дорожного катка при уплотнении материалов и грунтов // Строительные и дорожные машины. 2019. № 7. С. 13–18.

23. Савельев С.В., Михеев В.В., Белодед А.С. Математическая модель процесса динамического деформирования уплотняемой упруго вязкой пластичной среды // Вестник СибАДИ. 2016. № 3(49). С. 99–105. DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2016-3(49)-99-105

24. Носов С.В. Математическое моделирование динамики наземных транспортно-технологических средств при взаимодействии с деформируемым опорным основанием: Монография. Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2016. 164 с.

25. Lu Y. et al. Research on vibratory & oscillatory coexistence nonlinear dynamics based on drum-subgrade coupling model // Int. J. Non. Linear. Mech. 2023. Vol. 157. P. 104536. DOI: https://doi.org/10.1016/j. ijnonlinmec.2023.104536

26. Adam D., Kopf F. Operational Devices for Compaction Optimization and Quality Control (Continuous Compaction Control & Light Falling Weight Device) // Proc. Int. Semin. Geotech. Pavement Railw. Des. Constr. Athens, Greece. 2004. P. 97–106.

27. Mooney M. et al. Intelligent Soil Compaction Systems. NCHRP Report 676. Washington, D.C.: Transportati on Research Board, 2010. 178 p.

28. Anderegg R., Kaufmann K. Intelligent compaction with vibratory rollers: feedback control systems in automatic compaction and compaction control // Transp. Res. 2004. Vol. 1868. P. 124–134.

29. Dobrescu C. The dynamic response of the vibrating compactor roller, depending on the viscoelastic properties of the soil // Appl. Syst. Innov. 2020. Vol. 3, Nº 2. P. 1–10. DOI: https://doi.org/10.3390/asi3020025

30. Dobrescu C. Comparative Analysis of the Voigt–Kelvin and Maxwell Models in the Compaction by Vibration Process // Springer Proc. Phys. Springer International Publishing, 2021. № 251. P. 359–366. DOI:10.1007/978-3-030-54136-1\_36

31. Мерданов Ш.М. Изготовление опытного образца вибрационного гидрошинного катка // Современные наукоемкие технологии. 2016. Т. 5, № 2. С. 270–275.

32. Савельев С.В., Михеев В.В., Сачук Ю.С. Эффективность использования вибрации в пневмошинных дорожных катках при устройстве автомобильных дорог // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 12. С. 640–641. DOI: https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-12-640-641

33. Захаренко А.В. Определение параметров резинового слоя на гладком вальце дорожного катка // Строительные и дорожные машины. 2018. № 1. С. 25–26.

34. Pistrol J. et al. Theoretical and experimental investigation of continuous compaction control (CCC) systems // 17th Nord. Geotechn. Meet. Challeng. Nord. Geotech. 25. P. 865–872. https://publik.tuwien.ac.at/file s/PubDat\_249454.pdf

35. Тюремнов И.С. О разработке методологии прогнозирования технологических возможностей ударно-вибрационных грунтоуплотняющих машин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 9. С. 689–692. DOI: https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-9-689-690

36. Тюремнов И.С., Игнатьев А.А. Уплотнение грунтов вибрационными катками : монография. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2012. 140 р.

37. Тюремнов И.С., Игнатьев А.А. Расчёт распределения напряжений в грунтах с линейным законом изменения плотности по глубине от динамической поверхностной нагрузки // Строительные и дорожные машины. 2013. № 1. С. 40–42.

38. Тюремнов И.С. Обзор систем непрерывного контроля уплотнения грунта для вибрационных катков. Часть 3. Особенности функционирования и "интеллектуальное уплотнение" // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2016. № 2(41). С. 115–122.

39. Тюремнов И.С., Игнатьев А.А., Попов Ю.Г. Анализ рекомендаций по назначению режимов работы вибрационных катков при уплотнении грунтов // Строительные и дорожные машины. 2011. № 12. С. 31–35.

## REFERENCES

1. Tyuremnov I.S., Ignat'ev A.A., Filatov I.S. Statistical analysis of technical characteristics for the soil vibrating rollers. *Bulletin of PNU*. 2014; 3(34): 81–88. (in Russ.)

2. Tyuremnov I.S. Technical parameters analyses of different types of impact-vibration soil compacting machines. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2023; 20(6): 706-716. (In Russ.) DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-706-716.

3. Fathi A. et al. Assessing depth of influence of intelligent compaction rollers by integrating laboratory testing and field measurements. *Transp. Geotech.* 2021; Vol. 28: 100509.

4. Shen J. et al. Co-simulation for optimal working parameter selection during soil vibratory compaction process. *J. Terramechanics*. 2024; Vol. 112: 45–57.

5. Li S. et al. Dynamic characteristics of subgrade-bridge transitions in heavy-haul railways under roller excitation. *Transp. Geotech*. 2021; Vol. 29: 100589.

6. Wu K. et al. Discrete Element Modeling of Vibration Compaction Effect of the Vibratory Roller in Roundtrips on Gravels. *J. Test. Eval.* 2021; 49: 20190910.

7. Peng H. et al. Discrete element simulation of vibration compaction of slag subgrade. *Sci. Rep.* 2024; Vol. 14.

8. Quist J. et al. UNDERSÖKNING AV SEPARA-TIONSEFFEKTER VID KOMPAKTERING AV OBUND-NA MATERIAL. SBUF ID: 13820. 2021. 56 p.

9. Li Y., She C. Discrete Simulation of Vibratory Roller Compaction of Field Rockfills. *Shock Vib.* 2021; Vol. 2021: 1–15.

10. Popov G.N. Selection parameters of trailed vibratory rollers for compaction of soil bases. *Tr. LPI*. 1972; *vyp*. 321: 114–119. (in Russ.)

11. Anderegg R., Von Felten D.A., Kaufmann K. Compaction monitoring using intelligent soil compactors. *GeoCongress* 2006 Geotech. Eng. Inf. Technol. Age. Atlanta, 2006. Vol. 2006, № Jönsson. P. 41.

12. Shishkin E.A., Smolyakov A.A. Justification of the method of regulating the contact force of the vibrating roller with the compacted material. *Systems. Methods. Technologies.* 2022; 1 (53): 36-42 36 (in Russ.) DOI: https://doi.org/10.18324/2077-5415-2022-1-36-42

13. Shishkin E.A., Smolyakov A.A. Investigation of the Acceleration Spectrum of a Vibratory Roller in the Process of Soil Compaction. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22(2): 182-192. (In Russ.) DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-182-192. EDN: WLRDCA

14. Yoo T.-S., Selig E.T. Dynamics of Vibratory-Roller Compaction. *J. Geotech*. Eng. Div. ASCE. 1979; 105 (GT10):1211–1231.

15. Siminiati D., Hren D. Simulation on vibratory roller-soil interaction. *Adv.* Eng. 2008; 2, no 1: 111–120.

16. Pistrol J. et al. Consideration of the Variable Contact Geometry in Vibratory Roller Compaction. *In-frastructures*. 2023; 8, no 110: 1–15.

17. Shabanova G.I., Savelyev S.V., Bury G.G. Mathematical description of the vibrating system "vibrating working body - soil". *Vestnik SibADI*. 2013; 3(31): 102-107. (in Russ.)

18. Susante P., Mooney M. Capturing Nonlinear Vibratory Roller Compactor Behavior through Lumped Parameter Modeling. *J. Eng. Mech.* 1996; 684–693.

19. Shishkin E.A., Smolyakov A.A. Modeling of interaction between road roller vibrating drum and soil being compacted. *Transport, mining and construction engineering: science and production.* 2024; 26: 60–67. (In Russ.) DOI: https://doi.org/10.26160/2658-3305-2024-26-60-67

20. Tyuremnov I.S., Shorohov D.A. Vibrating roller with compacted soil interaction modelling. *The Russian Automobile and Highway Industry Jour-*

nal. 2024;21(2):202-216. (In Russ.) DOI: https://doi. org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-202-216.

21. Mikheyev V.V., Saveliev S.V. Modeling of properties of deformable soil media during compaction by cylindrical roller drums matematical modeling of compaction for elastoviscoplastic soil media caused by the interaction with work tool of compacting machine in the framework of modified. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017; (2(54)): 28-36. (In Russ.) DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-2(54)-28-36

22. Tarasov V.N., Boyarkina I.V., Serebrennikov V.S. Analytical method for studying the vertical displacements of the road roller vibratory roller during the compaction of materials and soils. *Construction and road building machines*. 2019; 7: 13–18. (in Russ.)

23. Saveliev S.V., Mikheev V.V., Beloded A.S. Mathematical model of denamic deformation of compacted elastic viscous plastic medium. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2016; (3(49)): 99-105. (In Russ.) DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2016-3(49)-99-105

24. Nosov S.V. Mathematical modelling of the dynamics of land transport and technological vehicles in interaction with a deformable support foundation: Monografiya. Lipetsk, 2016:164. (in Russ.)

25. Lu Y. et al. Research on vibratory & oscillatory coexistence nonlinear dynamics based on drum-subgrade coupling model. *Int. J. Non. Linear*. Mech. 2023; Vol. 157: 104536.

26. Adam D., Kopf F. Operational Devices for Compaction Optimization and Quality Control (Continuous Compaction Control & Light Falling Weight Device). *Proc. Int. Semin. Geotech. Pavement Railw. Des. Constr. Athens*, Greece. 2004: 97–106.

27. Mooney M. et al. Intelligent Soil Compaction Systems. NCHRP Report 676. Washington, D.C.: *Transportati on Research Board*, 2010: 178.

28. Anderegg R., Kaufmann K. Intelligent compaction with vibratory rollers: feedback control systems in automatic compaction and compaction control. *Transp.* Res. 2004; Vol. 1868: 124–134.

29. Dobrescu C. The dynamic response of the vibrating compactor roller, depending on the viscoelastic properties of the soil. *Appl. Syst. Innov.* 2020; Vol. 3, no 2: 1–10.

30. Dobrescu C. Comparative Analysis of the Voigt–Kelvin and Maxwell Models in the Compaction by Vibration Process. *Springer Proc. Phys. Springer International Publishing*. 2021; 251: 359–366.

31. Merdanov SH.M. Production of a prototype of a vibrating hydraulic tyre roller. *Modern high technologies*. 2016; 5, no 2: 270–275. (in Russ.)

32. Savel'ev S.V., Mikheev V.V., Sachuk YU.S. The effectiveness of the use of vibration in pneumatic tire road rollers in the construction of highways. *Izvestiya Tula State University (Izvestiya TulGU).* 2023; 12: 640–641. (in Russ.)

33. Zakharenko A.V. Determination of rubber layer parameters on the smooth roller of a road roller. *Construction and road building machines*. 2018; 1: 25–26. (in Russ.) 34. Pistrol J. et al. Theoretical and experimental investigation of continuous compaction control (CCC) systems. *17th Nord. Geotechn. Meet. Challeng. Nord. Geotech.* 25: 865–872.

35. Tyuremnov I.S. On development of methodology for predicting technological capabilities of impact-vibration soil compacting machines. *Izvestiya Tula State University (Izvestiya TulGU)*. 2024; 9: 689–692. (in Russ.) DOI: https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-9-689-690

36. Tyuremnov I.S., Ignat'ev A.A. *Soil compaction with vibrating rollers*: monograph. YAroslavi': Izd-vo YAGTU, 2012:140. (in Russ.)

37. Tyuremnov I.S., Ignat'ev A.A. Calculation of stress distribution in soils with linear law of density variation with depth from dynamic surface loading. *Construction and road building machines*. 2013; 1: 40–42. (in Russ.)

38. Tyuremnov I.S. Overview of continuous soil compaction monitoring systems for vibratory rollers. Part 3. Functional features and 'intelligent compaction'. *Bulletin of PNU*. 2016; 2(41):115–122. (in Russ.)

39. Tyuremnov I.S., Ignat'ev A.A., Popov YU.G. Analysis of recommendations on assigning operating

modes of vibratory rollers for soil compaction. *Construction and road building machines*. 2011; 12: 31–35. (in Russ.)

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Тюремнов Иван Сергеевич – канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Строительные и дорожные машины» Ярославского государственного технического университета (150023, г. Ярославль, Московский пр., 88).

ORCID: http: //orcid.org/0000-0003-2261-4153, SPIN-κοd: 9976-0728, e-mail: tyuremnovis@yandex.ru

#### **INFORMATION ABOUT AUTHOR**

Ivan S. Tyuremnov – Cand. of Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Construction and Road Machines, (88, Moskovsky Prospekt, Yaroslavl, 150023).

ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2261-4153, SPIN-код: 9976-0728, e-mail: tyuremnovis@yandex.ru