

Научная статья  
УДК 624.138.22: 51-7  
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-40-60>  
EDN: HEWKSB



## ОСОБЕННОСТИ РЕЖИМОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВАЛЬЦА ВИБРАЦИОННОГО КАТКА С ПОВЕРХНОСТЬЮ ГРУНТА

И.С. Тюремнов

Ярославский государственный технический университет,  
г. Ярославль, Россия  
[tyuremnovis@yandex.ru](mailto:tyuremnovis@yandex.ru)

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Для механизации уплотнения грунтов в дорожном строительстве широкое применение получили вибрационные катки. В связи с высокими значениями вынуждающей силы, генерируемой вибровозбудителем, вибрационный валец катка совершает колебания с периодическим отрывом от грунта. Исследование особенностей данных режимов колебаний имеет большое значение при обосновании технических характеристик вибрационных грунтовых катков при проектировании.

**Материалы и методы.** В работе представлена трёхмассная реологическая модель системы «рама-валец-грунт» с деформируемым вальцом. Масса грунта равнялась 20% массы вальца. Свойства грунта моделировалась схемой Фойгта. Реологическая модель позволяет воспроизводить различные режимы взаимодействия вальца с грунтом: без отрыва и с различными видами отрыва от грунта.

**Результаты.** На основании результатов вычислительного эксперимента с тестовыми вибрационными катками установлены характерные особенности колебаний вальца и рамы катка, а также изменения контактной силы и продолжительности нагружения и разгрузки грунта при реализации режимов колебаний «постоянный контакт», «частичный отрыв», «двойной прыжок» и колебаний кратности 2. Обоснована целесообразность разработки перспективных грунтоуплотняющих машин, функционирующих в режиме колебаний кратности 2 и обладающих увеличенной уплотняющей способностью за счет реализации контактной силы существенно большей, чем вынуждающая сила установленного вибровозбудителя колебаний при сравнительной высокой продолжительности действия контактной силы, что обеспечивает повышение глубины распространения напряжений и, соответственно, толщины уплотняемого слоя грунта.

**Обсуждение и заключение.** В работе уточнены критерии отнесения реализуемых режимов колебаний к режимам «постоянный контакт», «частичный отрыв», «двойной прыжок» и колебаний кратности 2. Также представлены новые данные по значениям продолжительности нагружения и разгрузки грунта при реализации различных режимов колебаний вальца вибрационного катка, что имеет большое значение при определении глубины распространения напряжений и уплотнения грунта на глубине.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** грунт, уплотнение, вибрация, динамическое уплотнение, каток вибрационный, моделирование реологическое, моделирование динамическое, режим работы, вынуждающая сила, контактная сила, амплитуда колебаний, время нагружения, время разгрузки, жесткость грунта

**БЛАГОДАРНОСТИ:** автор выражает благодарность д-ру техн. наук, профессору ЯГТУ Евгению Фёдоровичу Скурыгину за консультации при разработке реологической модели. Также автор благодарит редакторов и рецензентов данной работы.

**Статья поступила в редакцию 16.09.2025; одобрена после рецензирования 12.12.2025; принята к публикации 16.02.2026.**

**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. Особенности режимов взаимодействия вальца вибрационного катка с поверхностью грунта // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 1. С. 40-60. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-40-60>

© Тюремнов И.С., 2026



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article  
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-40-60>  
EDN: HEWKSB

## FEATURES OF INTERACTION MODES OF VIBRATORY ROLLER DRUM AND SOIL SURFACE

Ivan S. Tyuremnov

Yaroslavl State Technical University,

Yaroslavl, Russia

[tyuremnovis@yandex.ru](mailto:tyuremnovis@yandex.ru)

### ABSTRACT

**Introduction.** Vibratory rollers are widely used for soil compaction mechanization in road construction. Due to high values of the driving force generated by the vibration exciter, there is periodic separation of the vibratory roller drum from the ground during oscillations. The study into the features of these oscillation modes is of great importance in determining technical characteristics of vibratory rollers during design.

**Materials and methods.** The paper presents a three-mass rheological model of the Frame-Drum-Soil system with a deformable drum, the soil mass being equal to 20% of the drum mass. Voigt model was used to model the soil properties. The rheological model allows reproducing different modes of drum and soil interaction: those without and with various types of separation from the soil.

**Results.** Based on the results of computational experiment with a test vibratory roller, the characteristic features of the drum and the roller frame vibrations, as well as changes in the contact force and soil loading and unloading time for “continuous contact”, “partial uplift”, “double jump” oscillation modes and two-fold oscillations have been established. The expediency of developing promising soil compacting machines operating in two-fold oscillations mode and having an increased compaction performance due to the significantly greater contact force compared to the driving force of the installed vibration exciter and a comparatively long time for the contact force, which provides an increase in the depth of stress propagation and, accordingly, the thickness of the compacted soil layer.

**Discussion and conclusion.** The paper specifies the criteria for determining the oscillation modes implemented as the “constant contact”, “partial separation”, “double jump” modes or two-fold oscillations. New data are also presented on the values of soil loading and unloading time for various modes of drum vibration, which is important for determining the depth of stress propagation and deep soil compaction.

**KEYWORDS:** soil, compaction, vibration, dynamic compaction, vibratory roller, mathematical modeling, rheological modeling, numerical modeling, operational modes, driving force, contact force, the amplitude of the oscillations, soil loading time, soil unloading time, soil stiffness

**ACKNOWLEDGEMENT:** the author would like to recognize the efforts made by prof. Evgenij Skurygin who provided invaluable expert advice during rheological model development. The author would also like to thank the editors and the reviewers of his manuscript.

**The article was submitted: September 16, 2025; approved after reviewing: December 12, 2025; accepted for publication: February 16, 2026.**

**The author has read and approved the final manuscript.**

**Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.**

**For citation.** Tyuremnov I.S. Features of interaction modes of vibratory roller drum and soil surface. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (1): 40-60. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-40-60>

© Tyuremnov Ivan S., 2026



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

## ВВЕДЕНИЕ

Уплотнение грунтов является неотъемлемой частью технологического процесса строительства автомобильных дорог в промышленном, гражданском, мелиоративном и других видах строительства. Для механизации уплотнения грунтов в дорожном строительстве наиболее широко применение получили вибрационные катки.

Однако, несмотря на многолетний опыт проектирования и применения вибрационных катков, продолжаются дискуссии относительно обоснования технических характеристик катков при проектировании. Связано это со сложной динамикой взаимодействия вальца вибрационного катка с рамой машины и с уплотняемым грунтом, высокими значениями вынуждающей силы вибровозбудителя (до 5 и более раз превышающей вес вибровальцового модуля [1] и приводящей к возникновению периодического отрыва вальца от грунта), сложностью процессов изменения напряженно-деформированного состояния уплотняемого грунта при динамических нагрузках и другими факторами.

Для исследования особенностей взаимодействия вальца вибрационного катка с поверхностью уплотняемого грунта широко применяется реологическое моделирование. Исследователями предлагались различные реологические модели: одномассные (учитывающие только массу вальца [2, 3]; двухмассные, учитывающие массы вальца и грунта или вальца и рамы<sup>1</sup> [4, 5] трёхмассные, учитывающие массы вальца, рамы и грунта [6, 7, 8], а также многомассные [9]. Свойства грунта в реологических моделях учитываются идеализированными элементами упругого, вязкого и пластического сопротивления деформированию, установленных параллельно или последовательно в различных комбинациях. Хорошее сочетание сравнительной простоты и отображения существенных свойств грунта даёт моделирование грунта параллельно установленными элементами упругого и вязкого сопротивления (схема Фойгта) [7, 10, 11].

При моделировании взаимодействия вибрационного катка с уплотняемым грунтом важное значение имеет учет возможности

реализации не только безотрывного режима колебаний вальца на грунте (режим «постоянный контакт»), но и различных режимов с периодическим отрывом вальца от грунта, таких как «частичный отрыв», «двойной прыжок» и др. [6, 7, 12, 13, 14], представляющие наибольшую сложность, но при этом и наибольший практический интерес, поскольку наиболее эффективным режимом работы вибрационного катка является режим «частичный отрыв» [15]. Однако в работах отечественных исследователей вопросам анализа отрывных режимов взаимодействия вибрационного катка с грунтом уделяется недостаточно внимания. В работах зарубежных авторов встречаются различные трактовки отнесения колебаний к некоторым режимам. Также в известных работах практически не исследованы вопросы влияния реализуемых режимов колебаний на значения продолжительности нагружения и разгрузки грунта, оказывающие существенное влияние на глубину распространения напряжений в грунте и достигаемую плотность грунта на глубине.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для моделирования взаимодействия вальца вибрационного катка с поверхностью грунта была использована трёхмассная реологическая модель (рисунок 1), содержащая вибрационный валец массой  $m_d$ , раму массой  $m_f$  и грунт массой  $m_s$ . Валец связан с рамой через виброизоляторы, свойства которых моделируются параллельно установленными элементами упругого и вязкого сопротивления (схема Фойгта) с коэффициентами  $k_f$  и  $b_f$ , соответственно. Упругие и вязкие деформации грунта также моделируются параллельно установленными элементами упругого и вязкого сопротивления с коэффициентами, соответственно,  $k_s$  и  $b_s$ . Значение присоединенной массы грунта, на основании исследований [6, 16], рассчитывалось как  $m_s = 0,2 \cdot m_d$ . Деформируемость вальца катка моделировалась элементами упругого и вязкого сопротивления с коэффициентами, соответственно,  $k_d$  и  $b_d$  (см. рисунок 1). Более подробное описание реологической модели и сделанных допущений приведено в [17].

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

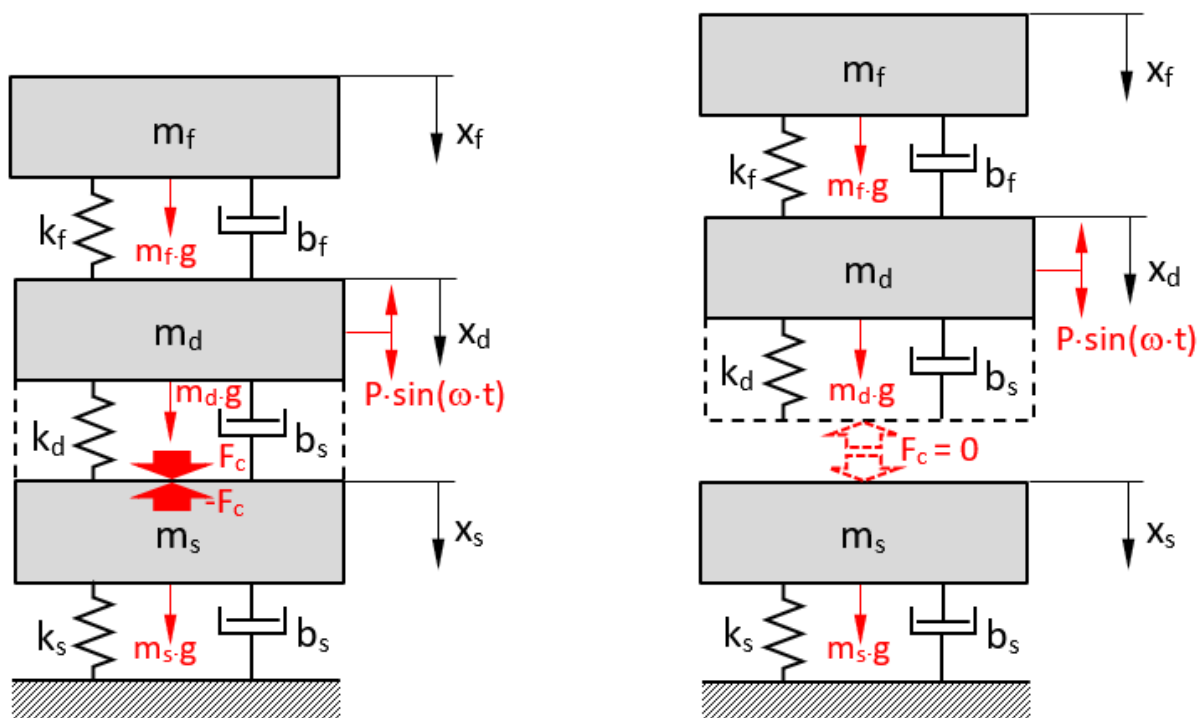


Рисунок 1 – Трёхмассная реологическая модель системы «рама-валец-грунт» с деформируемым вальцом (слева – в контакте с грунтом; справа – в отрыве от грунта) [17].

Figure 1 – Three-mass rheological model of Frame-Drum–Soil system with a deformable drum (on the left – in contact with the soil; on the right – in separation from the soil) [17].

Дифференциальные уравнения движения масс системы «рама-валец-грунт» в контакте с грунтом [17]:

$$\begin{cases} m_f \cdot \ddot{x}_f + b_f \cdot (\dot{x}_f - \dot{x}_d) + k_f \cdot (x_f - x_d) = m_f \cdot g; \\ m_d \cdot \ddot{x}_d - b_f \cdot (\dot{x}_f - \dot{x}_d) - k_f \cdot (x_f - x_d) + b_d \cdot (\dot{x}_d - \dot{x}_s) + \\ + k_d \cdot (x_d - x_s) = m_d \cdot g + P \cdot \sin(\omega t); \\ m_s \cdot \ddot{x}_s + k_s \cdot x_s + b_s \cdot \dot{x}_s - b_d \cdot (\dot{x}_d - \dot{x}_s) - k_d \cdot (x_d - x_s) = m_s \cdot g \end{cases}, \quad (1)$$

где  $\ddot{x}_f, \ddot{x}_d, \ddot{x}_s$  – ускорение, соответственно, рамы, вальца и грунта, м/с<sup>2</sup>;  $b_f, b_d, b_s$  – коэффициенты вязкого сопротивления деформированию, соответственно, виброизоляторов, вальца и грунта, Н·с/м;  $\dot{x}_f, \dot{x}_d, \dot{x}_s$  – вертикальная скорость перемещения, соответственно, рамы, вальца и грунта, м/с;  $k_f, k_d, k_s$  – коэффициенты упругого сопротивления деформированию, соответственно, виброизоляторов, вальца и грунта, Н/м;  $x_f, x_d, x_s$  – вертикальная координата, соответственно, рамы, вальца и грунта, м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $P$  – вынуждающая сила, Н;  $\omega$  – угловая скорость вибровозбудителя, рад/с.

Дифференциальные уравнения движения масс в режиме отрыва от грунта [17]:

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

Контактная сила (сила реакции грунта на валец):

$$F_c = b_d \cdot (\dot{x}_d - \dot{x}_s) + k_d \cdot (x_d - x_s) = m_s \cdot \ddot{x}_s + k_s \cdot x_s + b_s \cdot \dot{x}_s - m_s \cdot g. \quad (3)$$

Условие неприлипания грунта к вальцу:

$$F_s > 0. \quad (4)$$

В режиме контакта с грунтом  $F_c \leq 0$ . В режиме отрыва от грунта  $F_c = 0$ .

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

$$x_d \leq x_s. \quad (5)$$

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

Верификация реологической модели осуществлялась путем сравнения результатов расчета ускорений и перемещений вальца и рамы вибрационных катков DM-614, DM-617 и с результатами экспериментальных исследований, показавших в целом хорошее соответствие расчетных значений с экспериментальными данными.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

После верификации по разработанной реологической модели было проведено исследование режимов колебаний, реализуемых вибрационным катком. Реализуемый режим колебаний оказывает большое влияние на эффективность функционирования грунтовых вибрационных катков. Однако данный вопрос практически не освещён в работах отечественных исследователей, поскольку в большинстве работ рассматриваются безотрывные режимы взаимодействия вальца вибрационного катка с уплотняемым грунтом [18, 19, 20]. В то время как за рубежом вопросами изучения отрывных режимов колебаний вибрационных катков стали активно заниматься после основополагающих работ D. Adam [13], R. Anderegg [15] и других авторов.

В зависимости от сочетания характеристик грунта, массы уплотняющего модуля вибрационного катка, вынуждающей силы, частоты колебаний, скорости движения катка и свойств уплотняемого грунта, колебания вальца могут осуществляться в режимах «постоянный контакт» (continuous contact), «частичный отрыв» (partial uplift), «двойной прыжок» (double jump),

«раскачивание» (rocking motion) и хаотических колебаний (chaotic motion) [13, 14, 15, 21] (рисунок 2). Смена режимов колебаний осуществляется в процессе уплотнения при изменении характеристик грунта (по мере его уплотнения) и режимов работы катка (характеризующихся сочетанием вынуждающей силы, частоты колебаний и скорости движения). Исследование разработанной трёхмассной реологической модели взаимодействия элементов системы «рама-валец-грунт» с деформируемым вальцом показало возможность её использования для анализа характерных особенностей, присутствующих различным режимам колебаний.

На рисунках 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 представлены некоторые осциллограммы (полученные в MATLAB Simulink) изменения во времени различных параметров системы «рама-валец-грунт» при исследовании влияния свойств грунта на характеристики колебаний элементов тестового вибрационного катка с характеристиками: масса вальца  $m_d = 4000$  кг; масса рамы вальца  $m_f = 4000$  кг; масса присоединенного грунта  $m_g = 800$  кг; частота колебаний  $f = 30$  Гц; вынуждающая сила  $P = 270$  кН; коэффициент упругого сопротивления виброизоляторов рамы  $k_f = 9,74$  МН/м; коэффициент вязкого сопротивления виброизоляторов рамы  $b_f = 26$  кН·с/м [17]. Значение коэффициента упругого сопротивления деформированию вальца  $k_d$  определялось на основании анализа деформаций по трехмерной модели вальца катка DM-617 (предоставленной производителем ООО «Завод «Дорожных машин»», г. Рыбинск, Ярославская обл.) при нагружении погруженной части вальца распределенной нагрузкой от грунта и составило  $k_d = 5000$  МН/м. Значение коэффициента вязкого сопротивления деформированию вальца  $b_d$  рассчитывалось с учетом рекомендаций разработчика программы «Универсальный механизм» и составило  $b_d = 2000$  кН·с/м.

В процессе вычислительного эксперимента исследовалось влияние изменения коэффициента упругого сопротивления грунта  $k_s$  (в диапазоне  $k_s = 20 \dots 200$  МН/м, соответствующему диапазону изменения коэффициента уплотнения песчаных грунтов  $K_y = 0,892 \dots 1,088$ ) при постоянном значении коэффициента вязкого сопротивления грунта  $b_s = 200$  кН·с/м.

drum motion	interaction drum-soil	mode of operation	soil contact force	application of CCC	soil stiffness	roller speed	excitation amplitude
periodic	continuous contact	Continuous Contact		yes	low ↓ high	fast ↓ slow	small ↓ large
	periodic loss of contact	Partial Uplift		yes			
		Double Jump		yes			
		Rocking Motion		no			
chaotic	non-period. loss of contact	Chaotic Motion		no			

Рисунок 2 – Основные режимы колебаний вальца вибрационного катка по D. Adam [14]

Figure 2 – The main modes of vibratory roller oscillations, according to D. Adam [14]

На рисунках 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 осциллограмма «X<sub>d</sub>, X<sub>s</sub>» отображает изменение во времени вертикальных координат вальца  $x_d$  (в метрах, чёрная линия) и грунта  $x_s$  (в метрах, розовая линия); осциллограмма « $F_c < 0$ » отображает изменение контактной силы (силы реакции грунта)  $F_c$  (в ньютонах); осциллограммы «X''f» и «Xf», соответственно, вертикальных ускорений рамы (м/с<sup>2</sup>) и вертикальных перемещений  $x_f$  рамы вибрационного катка (в метрах). Осциллограмма «U2» (см. рисунки 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9) отображает значение условия U2, характеризующего наличие контакта между вальцом вибрационного катка и грунтом (при контакте U2 = 1, при отрыве U2 = 0). На всех осциллограммах ось абсцисс – время (в секундах).

В начальной стадии уплотнения грунта валец катка реализует режим колебаний «постоянный контакт» (см. рисунок 3). Для данного режима характерно совместное движение вальца и грунта на протяжении всего цикла каждого колебания. На протяжении всего времени в каждом цикле колебаний  $(x_d - x_s) > 0$  (валец всегда контактирует с грунтом), т.е. значение условия U2 = 1. Значение контактной силы  $F_c$  на протяжении всего времени

каждого цикла колебания отрицательно (сила действует от грунта вверх на валец, ось координат направлена сверху вниз). Осциллограмма контактной силы имеет симметричный вид (продолжительность нагружения равна продолжительности разгрузки, т.е.  $t_n = t_p$ ). Колебания рамы гармонические с постоянной частотой и амплитудой (см. рисунок 3). Таким образом, критериями реализации режима «постоянный контакт» являются:

- одновременное выполнение двух условий: U2 = 1 и  $F_c < 0$  в течение всего времени внутри каждого цикла колебаний;
- равенство в смежных циклах колебаний значений амплитуд (и размахов) колебаний вальца  $x_d$ , рамы  $x_f$ , а также максимального значения контактной силы  $F_c^{max}$ ;
- осциллограмма контактной силы  $F_c$  имеет симметричный вид (продолжительность нагружения  $t_n$  равна продолжительности разгрузки  $t_p$  грунта, т.е.  $t_n = t_p = 1/(2f)$  и являются максимальными для заданной частоты колебаний  $f$ );
- частота воздействий вальца на грунт и частота колебаний рамы равна частоте вынуждающей силы.

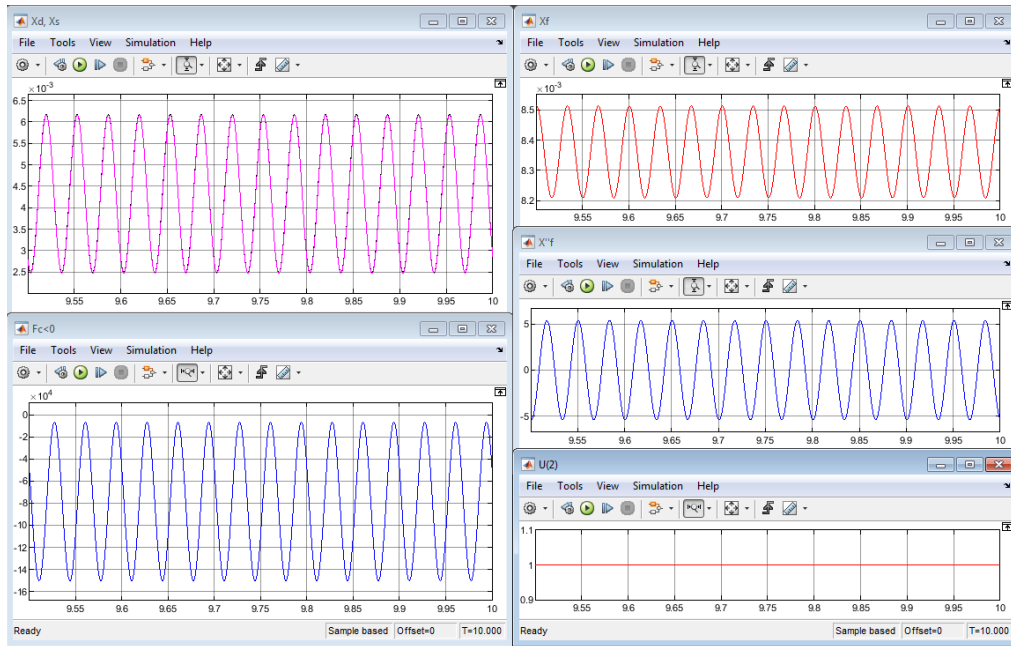


Рисунок 3 – Осциллограммы колебаний различных элементов тестового вибрационного катка с  $P = 270$  кН при  $k_s = 20$  МН/м (режим «постоянный контакт») Источник: составлено автором.

Figure 3 – Oscillations of various elements of the test vibratory roller with  $P = 270$  kN at  $k_s = 20$  MN/m (“continuous contact” mode) Source: compiled by the author.

В режиме «частичный отрыв» (см. рисунок 4) валец катка в каждом цикле колебаний отрывается от грунта (в пределах каждого цикла колебаний на некоторое время нарушается условие  $(x_d - x_s) > 0$ ). Т.е. в пределах каждого цикла колебаний на некоторое время условие  $U_2$  принимает значение  $U_2 = 0$ . При этом амплитуда смежных отскоков вальца одинакова. Размах колебаний рамы в смежных циклах колебаний также одинаков. Контактная сила  $F_c$  на фазе отрыва вальца от грунта (потери контакта вальца с грунтом) принимает нулевое значение, т.е.  $F_c = 0$ . Значения максимальной контактной силы  $F_c^{\max}$  в смежных циклах колебаний одинаковы. Осциллограмма изменения контактной силы  $F_c$  в каждом цикле колебаний становится асимметричной (продолжительность разгрузки грунта  $t_p$  превышает продолжительность нагружения  $t_h$ , т.е.  $t_p > t_h$ ). Это соответствует наблюдаемой в эксперимен-

тальных исследованиях характерной особенности изменения контактных напряжений [22] в режиме «частичный отрыв». Сохраняется гармонический характер колебаний рамы с постоянной частотой и амплитудой.

Таким образом, критериями реализации режима «частичный отрыв» являются:

- выполнение на некоторое время в каждом цикле колебаний условий:  $U_2 = 0$  и  $F_c = 0$ ;
- равенство на смежных циклах колебаний значений амплитуд колебаний вальца  $x_d$ , рамы  $x_p$ , а также максимального значения контактной силы  $F_c^{\max}$ ;
- асимметричный вид осциллограммы контактной силы  $F_c$  (продолжительность нагружения меньше продолжительности разгрузки, т.е.  $t_h < t_p$ ,  $t_h < 1/(2f)$ ;  $t_p < 1/(2f)$ );
- частота воздействий вальца на грунт и частота колебаний рамы равна частоте вынуждающей силы.

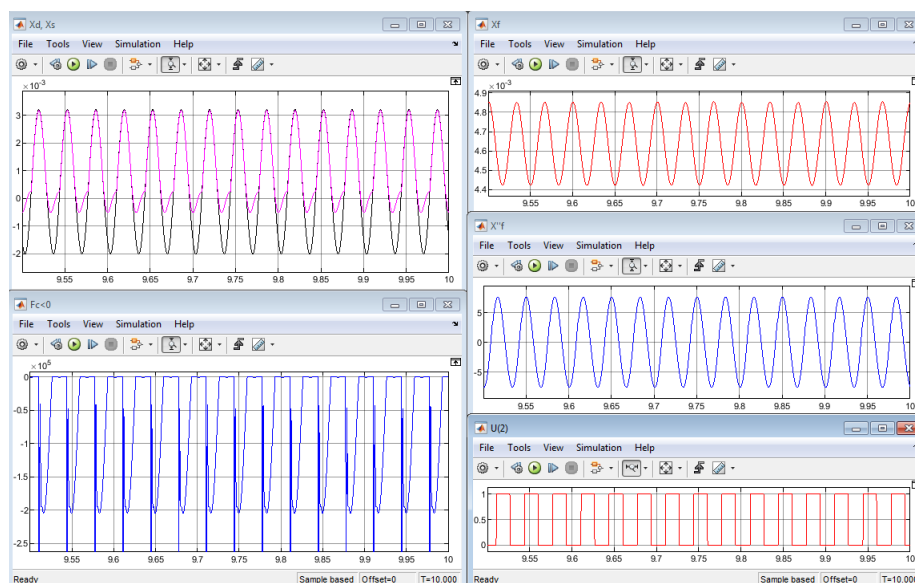


Рисунок 4 – Осциллограммы колебаний различных элементов тестового вибрационного катка с  $P = 270$  кН при  $k_s = 80$  МН/м (режим «частичный отрыв») Источник: составлено автором.

Figure 4 - Oscillations of various elements of the test vibratory roller with  $P = 270$  kN at  $k_s = 80$  MN/m ("partial uplift" mode) Source: compiled by the author.

По данным зарубежных исследователей, колебания в конце режима «частичный отрыв» являются наиболее эффективным режимом колебаний вальца вибрационного катка при уплотнении грунта [15].

В режиме «двойной прыжок» (см. рисунки 5, 6, 7,8) в смежных циклах колебаний максимальные и минимальные амплитудные значения вертикальных перемещений и вальца и рамы становятся различны. Причем по мере уплотнения грунта увеличивается разница в амплитудных значениях перемещений вальца и рамы с максимальными и минимальными амплитудами. Для перемещений рамы гармоника с минимальными амплитудами колеба-

ний быстро вырождается (см. осциллограмму «Xf» на рисунке 6) и частота колебаний рамы становится в 2 раза меньше частоты колебаний вальца (см. рисунок 7). При этом размах колебаний рамы возрастает. Для вертикальных колебаний вальца гармоника с малыми амплитудами сохраняется на протяжении всего режима «двойной прыжок».

Для осциллограммы изменения контактной силы  $F_c$  характерна асимметричность осциллограммы в каждом цикле колебаний как с большой, так и с малой амплитудами (во всех случаях продолжительность разгрузки грунта  $t_p$  превышает продолжительность нагружения  $t_n$ , т.е.  $t_p > t_n$ ).

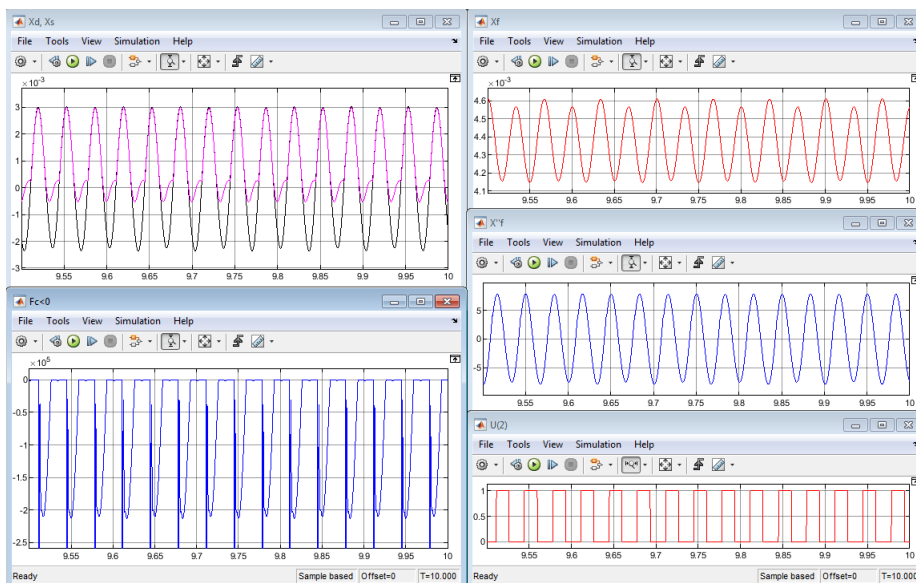


Рисунок 5 – Осциллограммы колебаний различных элементов тестового вибрационного катка с  $P = 270$  кН при  $k_s = 90$  МН/м (начало режима «двойной прыжок») Источник: составлено автором.

Figure 5 - Oscillations of various elements of the test vibratory roller with  $P = 270$  kN at  $k_s = 90$  MN/m (the beginning of the “double jump” mode) Source: compiled by the author.

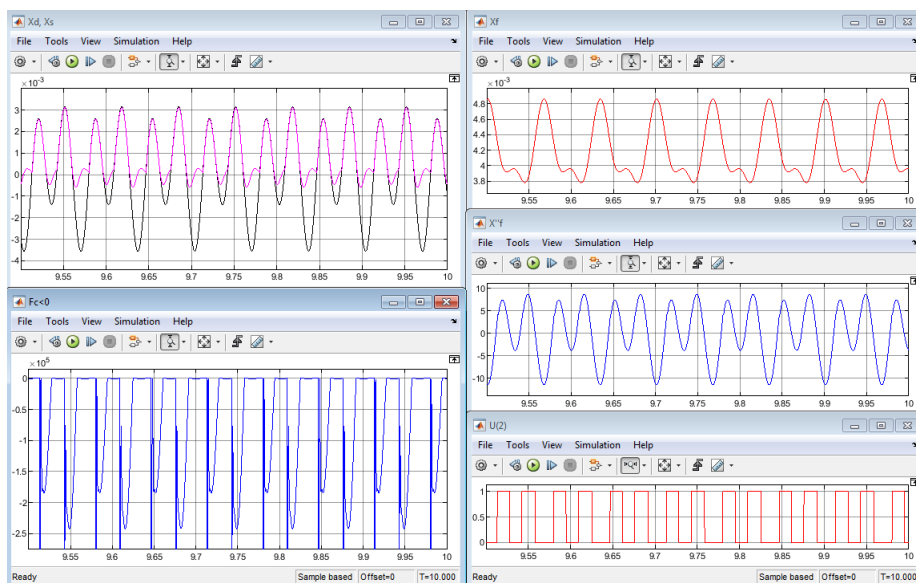


Рисунок 6 – Осциллограммы колебаний различных элементов тестового вибрационного катка с  $P = 270$  кН при  $k_s = 95$  МН/м (режим «двойной прыжок») Источник: составлено автором.

Figure 6 – Oscillations of various elements of the test vibratory roller with  $P = 270$  kN at  $k_s = 95$  MN/m (“double jump” mode) Source: compiled by the author.

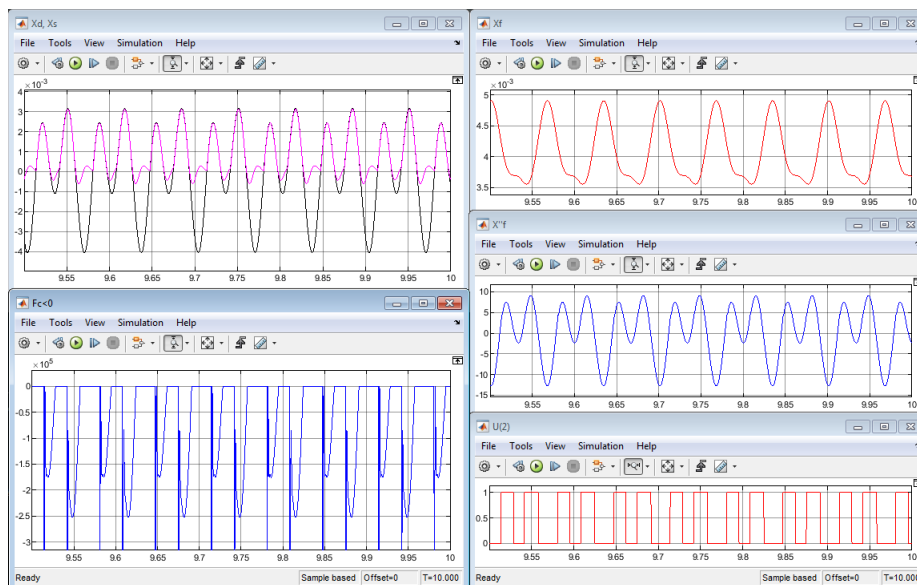


Рисунок 7 – Осциллограммы колебаний различных элементов тестового вибрационного катка с  $P = 270$  кН при  $k_s = 98$  МН/м (режим «двойной прыжок», изменение частоты колебаний рамы)  
 Источник: составлено автором.

Figure 7 - Oscillations of various elements of the test vibratory roller with  $P = 270$  kN at  $k_s = 98$  MN/m (“double jump” mode, changing the vibratory frequency of the frame)  
 Source: compiled by the author.

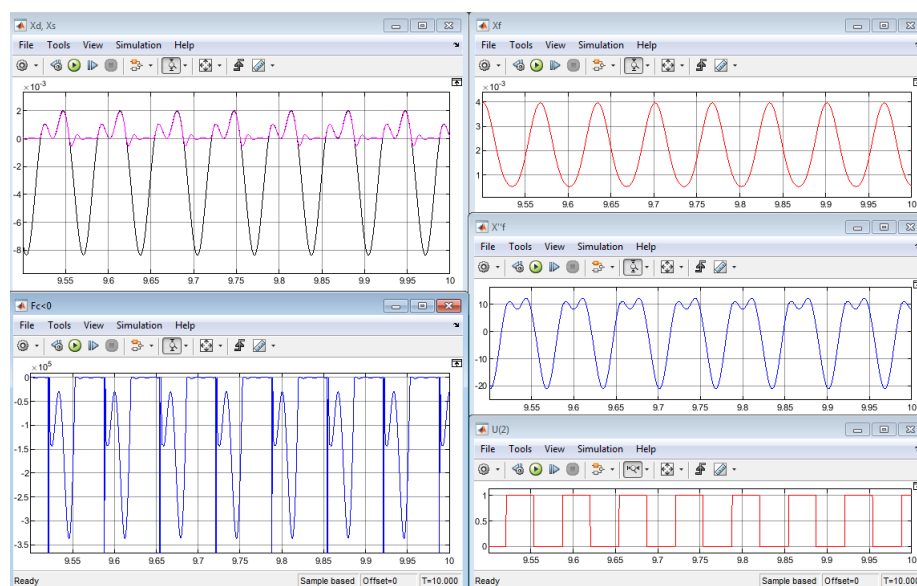


Рисунок 8 – Осциллограммы колебаний различных элементов тестового вибрационного катка с  $P = 270$  кН при  $k_s = 200$  МН/м (режим «двойной прыжок», исчезновение отрыва от грунта в воздействии с малой амплитудой)  
 Источник: составлено автором.

Figure 8 – Oscillations of various elements of the test vibratory roller with  $P = 270$  kN at  $k_s = 200$  MN/m (“double jump” mode, uplift disappearance, a low-amplitude impact)  
 Source: compiled by the author.

Однако на поздних стадиях режима «двойной прыжок» колебание вальца с малой амплитудой может осуществляться без отрыва от грунта (см. рисунок 8). При этом на осциллограмме контактной силы между воздействиями с минимальной и максимальной амплитудой значения  $F_c$  могут не достигать нуля. Осциллограммы  $F_c$  воздействий с минимальной и максимальной амплитудой асимметричны, но характер их различен. Осциллограмма  $F_c$  воздействия с малой амплитудой асимметрична со сдвигом влево (продолжительность нагружения меньше продолжительности разгрузки, т.е.  $t_h < t_p$ ), а осциллограмма  $F_c$  воздействия с большой амплитудой асимметрична со сдвигом вправо (продолжительность нагружения больше продолжительности разгрузки, т.е.  $t_h > t_p$ ).

Таким образом, критериями реализации режима «двойной прыжок» являются:

- выполнение на некоторое время в каждом цикле колебаний условий:  $U_2 = 0$  и  $F_c = 0$ ;
- неравенство в смежных циклах соответствующих значений амплитуд колебаний вальца  $x_{gr}$ , рамы  $x_p$ , а также максимального значения контактной силы  $F_c^{max}$  (или реализация рамой колебаний с частотой в 2 раза меньшей частоты колебаний вальца);
- асимметричный вид осциллограмм

контактной силы  $F_c$  (продолжительность нагружения меньше продолжительности разгрузки, т.е.  $t_h < t_p$  или для поздних стадий режима «двойной прыжок», для воздействия с малой амплитудой  $t_h < t_p$ , а для воздействия с большой амплитудой  $t_h > t_p$ ). Во всех случаях  $t_h < 1/(2f)$ ;  $t_p < 1/(2f)$ ;

– частота воздействий вальца на грунт равна частоте вынуждающей силы. Частота колебаний рамы становится в 2 раза меньше частоты вынуждающей силы.

При дальнейшем увеличении значения  $k_s$  колебания должны переходить в более сложные режимы («раскачивания», кратных колебаний и др). Однако при работе тестового катка с вынуждающей силой 270 кН не наблюдаются более сложные режимы колебаний, например, кратных колебаний, даже при  $k_s = 200$  МН/м.

Для получения осциллограмм, характерных для более сложных режимов, например, режима кратных колебаний, было увеличено значение вынуждающей силы тестового вибрационного катка с 270 до 300 кН. При  $k_s = 180$  МН/м для тестового катка с вынуждающей силой 300 кН гармоника колебаний вальца с малой амплитудой практически вырождается. При  $k_s = 183$  МН/м колебания реализуются в режиме кратных колебаний с кратностью 2 (см. рисунок 9).

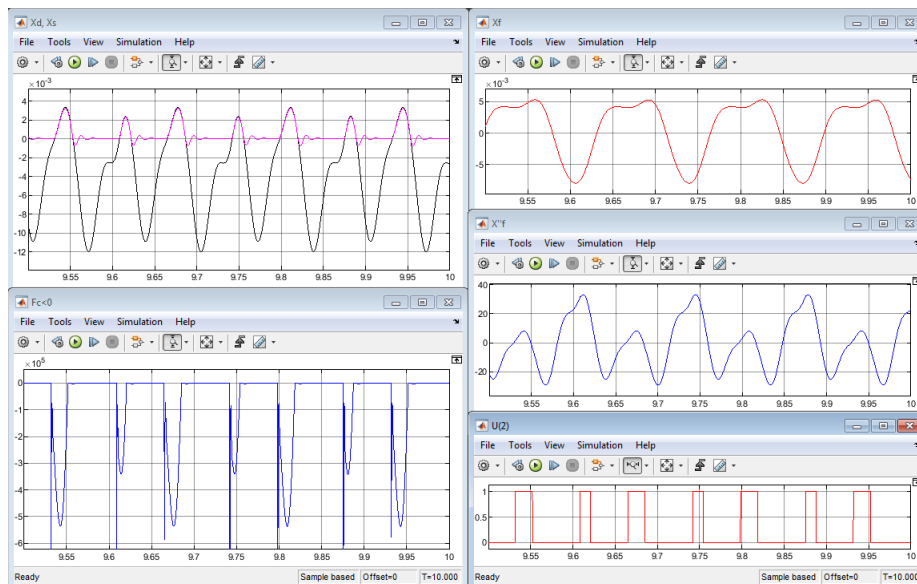


Рисунок 9 – Осциллограммы колебаний различных элементов тестового вибрационного катка с  $P = 300$  кН при  $k_s = 183$  МН/м (режим колебаний с кратностью 2)  
Источник: составлено автором.

Figure 9 - Oscillations of various elements of the test vibratory roller with  $P = 300$  kN at  $k_s = 183$  MN/m (two-fold oscillations mode)  
Source: compiled by the author.

Каждое воздействие на грунт валец наносит через 2 оборота вибровозбудителя, что соответствует удвоению периода или уменьшению в 2 раза частоты воздействий на грунт. Амплитуды колебаний вальца на смежных воздействиях снова начинают различаться. Также происходит очередное удвоение периода колебаний рамы при одновременном резком увеличении общего размаха её колебаний. Амплитудные значения максимальной контактной силы в смежных воздействиях снова начинают различаться при одновременном росте численных значений  $F_c^{\max}$ . Восстанавливается асимметрия осциллограммы  $F_c$ , при которой продолжительность нагружения  $t_n$  меньше продолжительности разгрузки  $t_p$  ( $t_n < t_p$ ) в циклах и с максимальной, и с минимальной  $F_c^{\max}$ .

Таким образом, критериями отнесения колебаний к режиму колебаний кратности 2 являются:

- наличие периодического отрыва вальца от грунта ( $U_2 = 0$  и  $F_c = 0$ ) в течение более, чем 50% общего времени;
- удвоение периода времени между воздействиями вальца на грунт;
- второе удвоение периода колебаний рамы (основная частота колебаний рамы в 2 раза меньше частоты воздействий вальца на грунт);
- неравенство значений амплитуд колебаний вальца  $x_d$ , а также максимального значения контактной силы  $F_c^{\max}$  в смежных циклах воздействия на грунт;
- асимметричный вид осциллограммы контактной силы  $F_c$  (продолжительность нагружения меньше продолжительности разгрузки, т.е.  $t_n < t_p$ ) в каждом цикле воздействия на грунт.

В отечественной практике для описания работы вибрационного катка в режиме кратности колебаний 2 также применяется термин «козление»<sup>2</sup>.

На рисунках 10, 11, 12, 13, 14 представлены некоторые результаты моделирования влияния изменения коэффициента упругого сопротивления грунта  $k_s$  на размах колебаний вальца  $x_d$ , рамы вальца  $x_f$ , а также максимальное значение контактной силы  $F_c^{\max}$ . Результаты получены для тестового вибрационного катка с характеристиками: масса вальца  $m_d = 4000$  кг; масса рамы вальца  $m_f = 4000$  кг;

масса присоединенного грунта  $m_f = 800$  кг; частота колебаний  $f = 30$  Гц; вынуждающая сила  $P = 300$  кН; коэффициент упругого сопротивления виброизоляторов рамы  $k_f = 9,74$  МН/м; коэффициент вязкого сопротивления виброизоляторов рамы  $b_f = 26$  кН·с/м. Коэффициент вязкого сопротивления грунта  $b_s = 200$  кН·с/м.

Диапазон значений  $k_s < 20$  МН/м является нехарактерным для работы вибрационных катков, поскольку соответствует малым значениям коэффициента уплотнения грунта ( $K_y < 0,89$ ) (или значению динамического модуля деформации грунта  $E_{vd} < 13$  МПа), т.е. состоянию грунта после отсыпки перед началом уплотнения. Поскольку для тестового катка с  $P = 300$  кН относительная вынуждающая сила составляет  $P/Q_b = 3,75$  (что существенно превышает критические значения, установленные Н.Я. Хархутой<sup>3</sup>), то даже при малых значениях  $k_s$  колебания реализуются не в режиме «постоянный контакт», а в режиме «частичный отрыв». Режим «частичный отрыв» наблюдается вплоть до  $k_s \leq 80$  МН/м. В режиме «частичный отрыв», являющимся основным режимом работы вибрационных катков, в процессе уплотнения грунта (сопровождающегося увеличением значения  $k_s$ ) с увеличением значений  $k_s$  размах колебаний вальца  $x_d$  и рамы  $x_f$  катка, а также максимальной контактной силы  $F_c^{\max}$  возрастает по почти линейному закону (см. рисунки 10, 11, 12). При этом следует отметить, что в режимах «постоянный контакт» и «частичный отрыв» контактная сила, передаваемая вальцом вибрационного катка в грунт в 1,5...2 раза меньше вынуждающей силы, генерируемой вибровозбудителем вальца катка. В процессе уплотнения грунта, вследствие увеличения размаха  $x_d$  колебаний вальца вибрационного катка, увеличивается и время, в течение которого теряется контакт вальца с грунтом, что при постоянной частоте колебаний приводит к уменьшению продолжительности фазы контакта с грунтом, а следовательно, к уменьшению времени нагружения грунта  $t_n$  и времени его разгрузки  $t_p$  (см. рисунки 13, 14). При этом с увеличением  $k_s$  возрастает асимметричность осциллограммы изменения контактной силы  $F_c$  в каждом цикле колебаний (продолжительность разгрузки грунта  $t_p$  все больше превышает продолжительность нагружения  $t_n$ , т.е. увеличивается соотношение  $t_p/t_n$ ).

<sup>2</sup> Уплотнение и укладка. Теория и практика. С-Пб.: Динапак СНГ, Рекламное агентство А.М.Г., 2008. 90 с.

<sup>3</sup> Хархута Н.Я. Дорожные машины. Теория конструкция и расчет : учебник для вузов. 2-е изд.. Л: Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1976. 472 с.

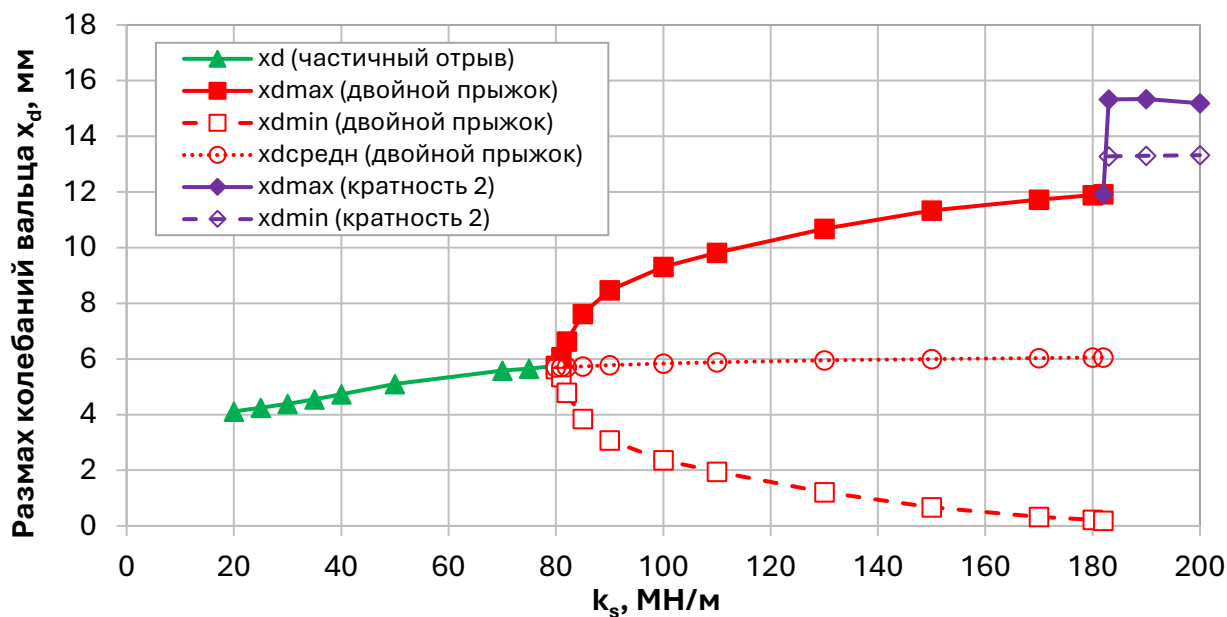


Рисунок 10 – Влияние изменения коэффициента упругого сопротивления грунта  $k_s$  на размах колебаний вальца  $x_d$  тестового вибрационного катка при  $P = 300$  кН  
Источник: составлено автором.

Figure 10 – The effect of changes in soil elastic resistance coefficient  $k_s$  on the drum oscillations amplitude in the test vibratory roller at  $P = 300$  kN  
Source: compiled by the author.

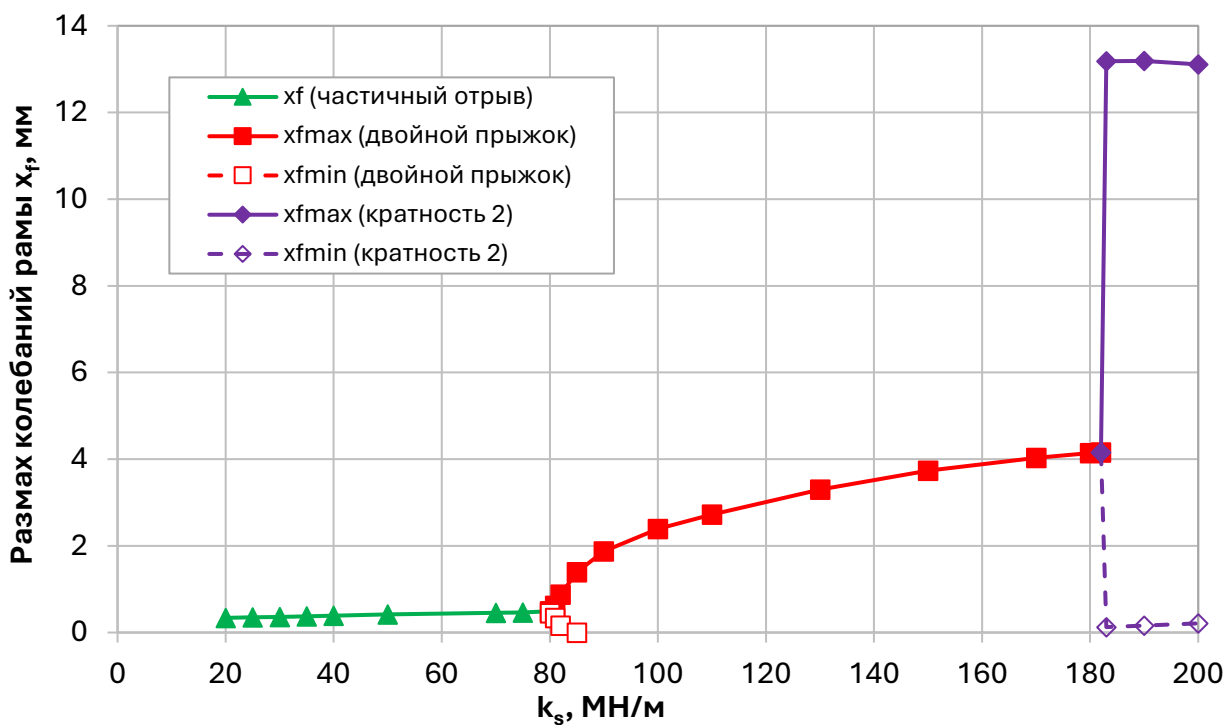


Рисунок 11 – Влияние изменения коэффициента упругого сопротивления грунта  $k_s$  на размах колебаний рамы  $x_f$  тестового вибрационного катка при  $P = 300$  кН  
Источник: составлено автором.

Figure 11 - The effect of changes in soil elastic resistance coefficient  $k_s$  on the frame oscillations amplitude  $x_f$  in the test vibratory roller at  $P = 300$  kN  
Source: compiled by the author.

При  $k_s = 80$  МН/м у тестового вибрационного катка с  $P = 300$  кН наблюдается смена режима колебаний «частичный отрыв» на «двойной прыжок». Это сопровождается качественными изменениями в характере колебаний и амплитудных значениях размаха колебаний вальца  $x_d$ , рамы  $x_f$  и контактной силы (силы реакции грунта)  $F_c^{\max}$ . Значению  $k_s = 80$  МН/м соответствует точка бифуркации, после которой в колебаниях начинают присутствовать две гармоники – высокоамплитудная (соответственно,  $x_{d\max}$ ,  $x_{f\max}$  и  $F_{c1}^{\max}$ ) и низкоамплитудная (соответственно,  $x_{d\min}$ ,  $x_{f\min}$  и  $F_{c2}^{\max}$ ) (см. рисунки 10, 11, 12). Размах колебаний вальца и рамы катка на высокоамплитудной гармонике скачкообразно возрастает, что негативно влияет на управляемость катка, приводит к резкому увеличению динамических нагрузок на амортизаторы, подшипники, шарнир сочленения и другие узлы конструкции вибрационного катка, увеличению уровня вибрации во всех элементах конструкции, в т.ч. вибрации, передаваемой на оператора. Резкое увеличе-

ние контактной силы (силы реакции грунта) может приводить к избыточному воздействию и разрушению уплотняемого материала. В колебаниях рамы низкоамплитудная гармоника быстро вырождается, и колебания переходят в режим с частотой, меньшей в 2 раза (см. рисунки 6, 7, 8). В колебаниях вальца частота колебаний высокоамплитудной и низкоамплитудной гармоник совпадают. После возникновения режима «двойной прыжок», при дальнейшем увеличении значения  $k_s$  (в процессе уплотнения грунта) наблюдается одновременное увеличение размаха колебаний вальца на высокоамплитудной гармонике и уменьшение размаха колебаний на низкоамплитудной гармонике (см. рисунки 10, 12). При этом среднее значение размаха колебаний вальца  $x_{dcp}$  и контактной силы  $F_{csp}$  практически не изменяется. Только в режиме «двойной прыжок» значение максимальной контактной силы  $F_c^{\max}$  достигает значения вынуждающей силы  $P$ , а затем и превышает значение  $P$  (см. рисунок 12).

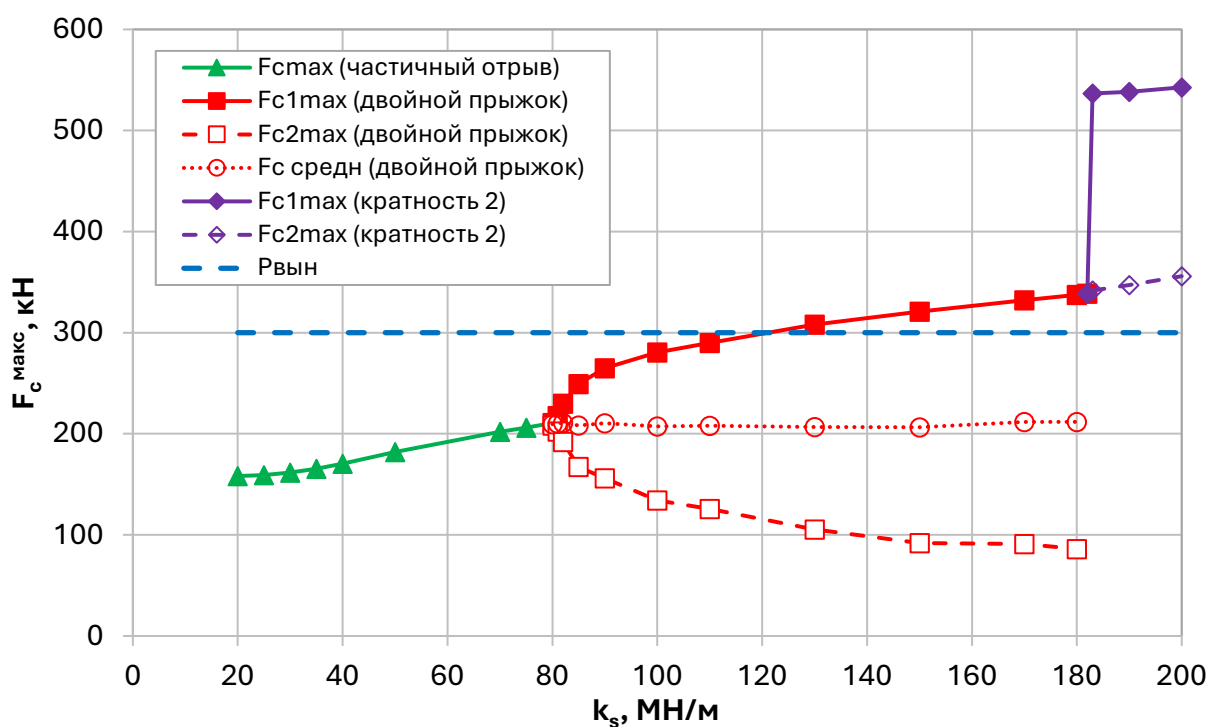


Рисунок 12 – Влияние изменения коэффициента упругого сопротивления грунта  $k_s$  на максимальное значение контактной силы (силы реакции грунта) вальца тестового вибрационного катка при  $P = 300$  кН  
Источник: составлено автором.

Figure 12 – The effect of changes in soil elastic resistance coefficient  $k_s$  on the maximum contact force value (reaction force of the soil) of the roller in the test vibratory roller at  $P = 300$  kN  
Source: compiled by the author.

Таким образом, получают объяснение рекомендации исследователей [2, 14, 23] и ведущих производителей вибрационных катков<sup>4,5</sup> о нежелательности реализации режима колебаний «двойной прыжок», поскольку при возникновении данного режима резко возрастают амплитуды колебаний вальца и рамы катка, а также максимальные значения контактной силы (силы реакции грунта), что негативно сказывается на управляемости машины, резко увеличивает нагрузки в элементах конструкции, а также может приводить к разуплотнению и даже разрушению уплотняемого материала. Наиболее эффективна работа вибрационного катка в конечной стадии режима «частичный отрыв» перед переходом в режим «двойной прыжок», поскольку при этом реализуются достаточно высокие значения контактной силы, а размах колебаний вальца и рамы находится в допустимых диапазонах.

В режиме «двойной прыжок» характер изменения значений времени нагружения грунта  $t_H$  и времени его разгрузки  $t_p$  сложнее, чем в режиме «частичный отрыв». Время нагружения грунта в высокоамплитудной гармонике  $t_H^{\max}$  начинает увеличиваться до определенного значения  $k_s$ , при котором колебания на низкоамплитудной гармонике начинают осуществляться без отрыва от грунта (см. рисунки 13, 7, 8). Для тестового вибрационного катка с  $P = 300$  кН это соответствовало значению  $k_s = 110$  МН/м. Затем значение времени нагружения грунта  $t_H$  оставалось практически неизменным (на достаточно высоком уровне), вплоть до перехода в режим кратных колебаний. Время нагружения грунта в низкоамплитудной гармонике  $t_H^{\min}$  оставалось практически постоянным на уровне, соответствующем времени нагружения грунта в конечной стадии режима «частичный отрыв» (см. рисунок 12). Время разгрузки грунта для высокоамплитудной гармонике  $t_p^{\max}$  уменьшалось с затухающей скоростью, в целом продолжая тенденцию, задаваемую значениями  $t_p$  в режиме «частичный отрыв» (см. рисунок 14). Время разгрузки грунта для низкоамплитудной гармонике  $t_p^{\min}$  вначале несколько увеличивалось, а затем, после перехода колебаний на низкоамплитудной гармонике в безотрывный от грунта режим (при  $k_s = 110$  МН/м), начинало уменьшаться,

вплоть до полного исчезновения перед переходом в режим кратных колебаний. Вероятно, это связано с постепенным уменьшением размаха колебаний вальца на низкоамплитудной гармонике.

Переходу в режим кратных колебаний соответствует вторая точка бифуркации, возникающая для используемого тестового вибрационного катка с  $P = 300$  кН при значении  $k_s = 182$  МН/м. При режиме колебаний кратности 2 в колебаниях вальца также присутствует высокоамплитудная и низкоамплитудная гармоники, но различие между их амплитудами не так значительно, как в режиме «двойной прыжок» (см. рисунок 10). И в целом увеличение размаха колебаний вальца при переходе в режим колебаний с кратностью 2 не так значительно, как при переходе в режим «двойной прыжок». В то время как амплитуда колебаний рамы увеличивается более чем в 2 раза по сравнению со значениями, соответствующему режиму «двойной прыжок» (см. рисунок 11). Также при переходе в режим колебаний кратности 2 существенно возрастает значение  $F_c^{\max}$ , которое становится почти в 2 раза больше вынуждающей силы, генерируемой вибровозбудителем катка (см. рисунок 12).

Это дает интересную возможность для разработки перспективных грунтоуплотняющих машин, функционирующих в режиме колебаний кратности 2 и обладающих увеличенной уплотняющей способностью за счет реализации контактной силы существенно большей, чем вынуждающая сила установленного вибровозбудителя колебаний. Очевидно, что такие машины не могут быть реализованы в виде традиционных самоходных вибрационных катков. Скорее всего, такие машины потребуют разработки специальной компоновки, возможно в прицепном варианте, чтобы исключить передачу высоких значений размаха колебаний рамы на базовую машину. Для уменьшения контактных напряжений при резко увеличившемся значении  $F_c^{\max}$  в таких перспективных грунтоуплотняющих машинах необходимо увеличение площади контакта рабочего органа с грунтом, что может быть осуществлено при использовании плоских рабочих органов, аналогичных рабочим органам виброплит.

<sup>4</sup> Машины для дорожного строительства CAT. Руководство по уплотнению грунта. QRБQ 1705. Caterpillar Inc., 2013. 132 с.

<sup>5</sup> Уплотнение асфальтобетона и грунта. HAMM AG 03.2011 212 4832. 2-е изд., 2011. 142 с.

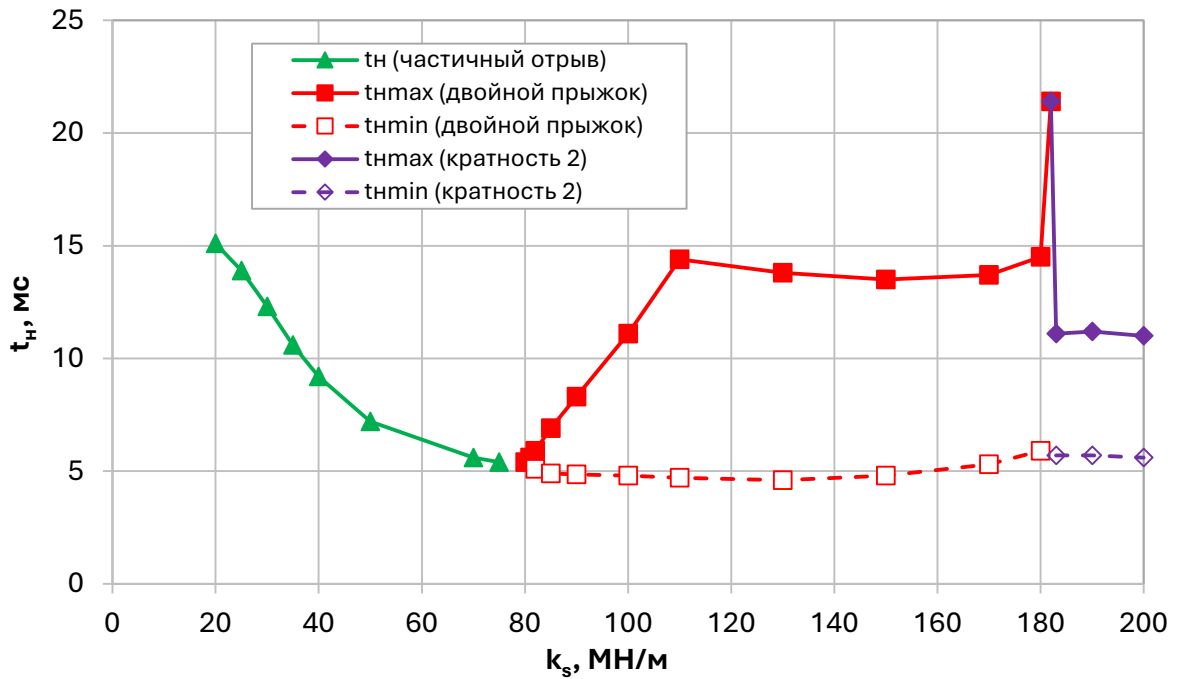


Рисунок 13 – Влияние изменения коэффициента упругого сопротивления грунта  $k_s$  на время нагружения грунта  $t_n$  тестовым вибрационным катком при  $P = 300$  кН  
 Источник: составлено автором.

Figure 13 - The effect of changes in soil elastic resistance coefficient  $k_s$  on soil loading time  $t_n$  for the test vibratory roller at  $P = 300$  kN  
 Source: compiled by the author.

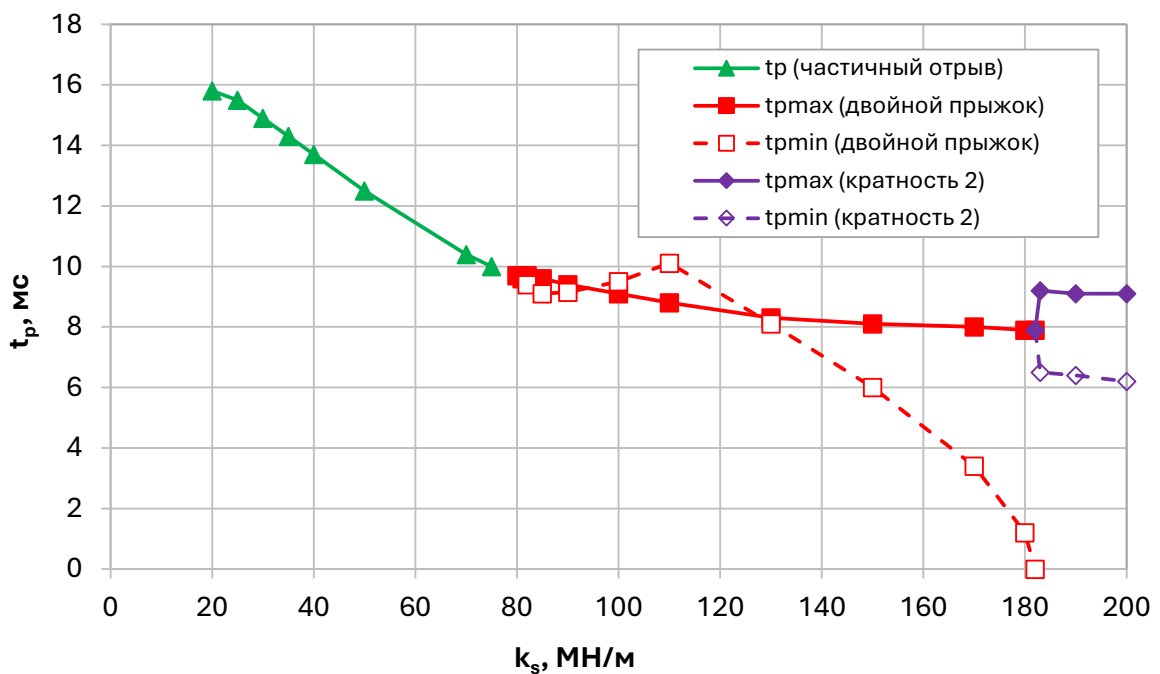


Рисунок 14 – Влияние изменения коэффициента упругого сопротивления грунта  $k_s$  на время разгрузки грунта  $t_p$  тестовым вибрационным катком при  $P = 300$  кН  
 Источник: составлено автором.

Figure 14 - The effect of changes in soil elastic resistance coefficient  $k_s$  on soil unloading time  $t_p$  for the test vibratory roller at  $P = 300$  kN  
 Source: compiled by the author.

Значения продолжительности нагружения и разгрузки грунта в режиме кратных колебаний незначительно меньше, чем в режиме «двойной прыжок» и примерно соответствуют общей продолжительности действия нагрузки, наблюдаемой в режиме «частичный отрыв», что позволяет рассчитывать на достаточно высокую глубину уплотнения грунта перспективными конструкциями грунтоуплотняющих машин, реализующих режим колебаний кратности 2, поскольку глубина уплотнения зависит от общего времени действия контактных напряжений на поверхности грунта [24, 25].

Полученные результаты позволяют расширить понимание влияния характеристик грунта и реализуемых режимов колебаний на изменение максимальной контактной силы  $F_c^{\max}$ , продолжительности нагружения  $t_n$  и разгрузки  $t_p$  грунта, важные с точки зрения методологии расчета влияния технических характеристик вибрационных катков и свойств грунта на распределение напряжений по глубине грунта и достигаемые на различных глубинах деформации грунта после каждого прохода катка [26].

## ОБСУЖДЕНИЕ

Следует отметить, что в работах зарубежных авторов встречаются несколько различные точки зрения на названия и характерные особенности некоторых режимов колебаний. Так, D.Adam и M.Mooney [14, 21] к режиму partial uplift относят колебания, при которых валец катка теряет контакт с грунтом в каждом цикле вибрации, не уточняя соотношения амплитуды отскоков на смежных циклах колебаний вальца, а к режиму double jump – колебания, при которых валец катка теряет контакт с грунтом более, чем на 1 цикл вибрации [21], что соответствует режиму колебаний кратности 2, принятому в отечественных исследованиях. В то же время в работе [27] Н. Brandl и D. Adam относят к режиму partial uplift колебания, при которых валец повторяет движения в каждом цикле вибрации, а к режиму double jump колебания, при которых валец повторяет движения через 2 или 4 цикла вибрации. Некоторые авторы, используя классификацию режимов D. Adam и M. Mooney [14, 21], внутри режима double jump выделяют подрежимы mild double jump («легкий двойной прыжок») и severe double jump («тяжелый двойной прыжок») [28]. К режиму «легкий двойной прыжок» предлагается относить колебания, при которых амплитуды смежных отскоков неодинаковы и по мере уплотнения грунта возрастает

разница в амплитудах смежных отскоков, то есть классический режим «двойного прыжка». К режиму «тяжелый двойной прыжок» предлагается относить колебания, при которых воздействие на грунт вальца вибрационного катка происходит через каждые 2 оборота вибровозбудителя, что соответствует режиму колебаний кратности 2, принятому в отечественных исследованиях.

В работе [15] авторов R. Anderegg и K. Kaufmann режим double jump называется bouncing. Отмечается, что работа вибрационного катка наиболее эффективна в конце режима partial uplift, непосредственно перед переходом в режим bouncing/double jump [2, 14, 23]. В режиме double jump/ bouncing воздействие вальца на грунт осуществляется с частотой работы вибровозбудителя. Также R. Anderegg и K. Kaufmann рассматривают режим rocking motion («раскачивания») как частный случай режима double jump, реализующийся в случае, когда собственная частота поперечных колебаний вальца меньше, чем частота генерации вынуждающей силы [15]. При этом разность фаз колебаний правой и левой кромки вальца составляет  $180^\circ$  [15]. В противном случае, вероятно, реализуется режим колебаний кратности 2.

Критерии отнесения колебаний к режиму continuous contact у D. Adam и R. Anderegg совпадают.

Таким образом, D. Adam в разных работах относит к режиму double jump режимы, называемые в данной работе «двойной прыжок» и «колебания кратности 2». В то же время R. Anderegg и K. Kaufmann [15] к режиму partial uplift относят только колебания, соответствующие режиму «частичный отрыв», а колебания в режиме bouncing – соответствующие режиму «двойной прыжок» данной работы.

С учетом несколько противоречивых мнений различных исследователей о характерных особенностях реализации различных режимов колебаний вальцов вибрационных катков, а также с учетом результатов исследований автора, в данной работе использовалась классификация режимов колебаний, в которой режиму continuous contact соответствует режим «постоянный контакт», режиму partial uplift соответствует режим «частичный отрыв», режиму double jump/bouncing – режим «двойной прыжок», режиму rocking motion – режим «раскачивания» и «кратные колебания». В данной работе режим «раскачивания» не исследуется, ограничиваясь режимом «кратные колебания». В качестве дополнительного ре-

жима введен режим «кратные колебания». Данная классификация режимов колебаний использует для каждого режима колебаний характерные особенности, наблюдающиеся между точками бифуркации, в которых колебания претерпевают качественную трансформацию и приобретают новые характерные особенности.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, в данной работе представлена реологическая модель взаимодействия вальца вибрационного катка с рамой и уплотняемым грунтом, позволяющая учитывать влияние существенных особенностей конструкции и режима работы катка (массу рабочего органа и рамы, частоту колебаний и вынуждающую силу вибровозбудителя, количество и характеристики амортизаторов) и характеристики грунтов (коэффициенты упругого и вязкого сопротивления грунта) на размах колебаний вальца и рамы, а также характер нагружения поверхности грунта.

Разработанная трёхмассная реологическая модель взаимодействия элементов системы «рама-валец-грунт» позволяет воспроизводить различные режимы взаимодействия вальца с грунтом: режим постоянного контакта с грунтом, режим частичного отрыва от грунта, режим двойного прыжка, а также более сложные режимы колебаний с кратностью более 1.

Реологическая модель воспроизводит асимметричный характер эпюры контактных напряжений грунта (контактной силы), наблюдаемый в экспериментальных исследованиях [22], что имеет важное значение для последующего анализа влияния продолжительности действия различных значений контактных напряжений на фазах нагружения и разгрузки грунта на глубину распространения волн напряжения в грунте и результирующее распределение напряжений по глубине грунта после каждого прохода катка [26].

Установлены характерные особенности реализации вальцом вибрационного катка различных режимов колебаний и показана необходимость учета реализуемого режима колебаний в качестве одного из ограничений при обосновании технических характеристик вибрационных грунтовых катков в процессе их проектирования или модернизации, а также в процессе уплотнения грунта.

Расширено понимание влияния характеристик грунта и реализуемых режимов колебаний на изменение максимальной контактной силы  $F_c^{\max}$ , продолжительности нагружения  $t_n$  и раз-

грузки  $t_p$  грунта, оказывающих существенное влияние на глубину распространения напряжений в грунте и достигаемую плотность грунта на глубине. Полученные результаты имеют большое значение для разработки методики обоснования технических характеристик вибрационных катков при их проектировании.

Обоснована возможность разработки перспективных грунтоуплотняющих машин, функционирующих в режиме колебаний кратности 2 и обладающих увеличенной уплотняющей способностью за счет реализации контактной силы существенно большей, чем вынуждающая сила установленного вибровозбудителя колебаний при сравнительной высокой продолжительности действия контактной силы, что обеспечивает повышение глубины распространения напряжений и, соответственно, толщины уплотняемого слоя грунта.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тюремнов И.С. Анализ технических характеристик различных типов ударно-вибрационных грунтоуплотняющих машин // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 6 (94). С. 706–716. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-706-716>
2. Anderegg R., Dominik von Felten A., Kaufmann K. Compaction monitoring using intelligent soil compactors // GeoCongress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age. 2006. № Jönsson (2006): P. 41.
3. Шишкин Е.А., Савкин Е.А., Смоляков А.А. Обоснование способа регулирования контактного усилия вибрационного вальца с уплотняемым материалом // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 1(53): 36–42. <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2022-1-36-42>
4. Pistol J., Hager M., Kopf F., Adam D. Consideration of the Variable Contact Geometry in Vibratory Roller Compaction // Infrastructures. 2023. № 110(8): 1–15. <https://doi.org/10.3390/infrastructures8070110>
5. Шабанова Г.И., Савельев С.В., Бурый Г.Г. Математическое описание колебательной системы «вибрационный рабочий орган – грунт» // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2013. № 3(31): 102–107. [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_19032661\\_60709817.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_19032661_60709817.pdf)
6. Susante P., Mooney M. Capturing Nonlinear Vibratory Roller Compactor Behavior through Lumped Parameter Modeling // Journal of Engineering Mechanics. 1996. P. 684–693. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2008\)134:8\(684\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2008)134:8(684))
7. 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: 60–67. <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2024-26-60-67>

8. Тюремнов И.С., Шорохов Д.А. Моделирование взаимодействия вибрационного катка с уплотняемым грунтом // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 2(96): 202–216. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-202-216>
9. 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): 28–36. [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-2\(54\)-28-36](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-2(54)-28-36)
10. Dobrescu C. The dynamic response of the vibrating compactor roller, depending on the viscoelastic properties of the soil // Applied System Innovation. 2020. № 2 (3): 1-10. <https://doi.org/10.3390/asi3020025>
11. Dobrescu C. Comparative Analysis of the Voigt–Kelvin and Maxwell Models in the Compaction by Vibration Process // Springer Proceedings in Physics. 2021. № 251: 359–366. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-54136-1\\_36](https://doi.org/10.1007/978-3-030-54136-1_36)
12. Lu Y., Liu J., Zhang J., Wang J. Research on vibratory & oscillatory coexistence nonlinear dynamics based on drum-subgrade coupling model // International Journal of Non-Linear Mechanics. – 2023. Vol. 157: 104536. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2023.104536>
13. Adam D., Kopf F. Operational Devices for Compaction Optimization and Quality Control (Continuous Compaction Control & Light Falling Weight Device) // Proceedings of the International Seminar on Geotechnics in Pavement and Railway Design and Construction, Athens, Greece. 2004. P. 97–106.
14. Adam D., Pistor 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 Ciclo. 2016. № Ccc. P. 1–41.
15. Anderegg R., Kaufmann K. Intelligent Compaction with Vibratory Rollers: feedback control systems in automatic compaction and compaction control. // Transportation Research, Record No. 1868. Washington D. C. 2004. P. 124–134.
16. 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 // Journal of Physics: Conference Series, Omsk, 23–24 апреля 2019 года. Vol. 1260, 11. – Omsk: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 112033. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1260/11/112033>
17. Тюремнов И.С. Исследование влияния динамических характеристик вибрационного катка на особенности взаимодействия элементов системы «рама-валец-грунт» // Вестник СибАДИ. 2025; 22(3):396–416. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-396-416>
18. Тарасов В.Н., Бояркина И.В., Серебренников В.С. Аналитический метод исследования вертикальных перемещений виброральца дорожного катка при уплотнении материалов и грунтов // Строительные и дорожные машины. 2019. № 7. С. 13–18.
19. Савельев С.В., Михеев В.В., Белодед А.С. Математическая модель процесса динамического деформирования уплотняемой упруго вязкой пластичной среды // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2016. № 3(49): 99–105. [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2016-3\(49\)-99-105](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2016-3(49)-99-105)
20. 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.
21. Mooney M., Rinehart R., Facas N., Musimbi O., White D. [и др.]. Intelligent Soil Compaction Systems. NCHRP Report 676 Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2010. 178 p. [http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp\\_rpt\\_676.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_676.pdf)
22. Tyuremnov I.S., Furmanov D.V. Experimental studies of stresses in soil affected by a vibratory roller // Journal of Physics: Conference Series: IV International Scientific and Technical Conference “Mechanical Science and Technology Update”, MSTU 2020, Omsk, 17–19 марта 2020 года. Vol. 1546. Omsk: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 012144. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1546/1/012144>
23. Pistor J., Hager M., Adam D., Kopf F., Theoretical and experimental investigation of continuous compaction control (CCC) systems, 17th Nordic Geotechn. Meet. Challeng. Nordic Geotechnic 25 (2016) 865–872. [https://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat\\_249454.pdf](https://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_249454.pdf)
24. Тюремнов И.С., Игнатьев А.А. Уплотнение грунтов вибрационными катками: монография. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2012. 140 с.
25. 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.
26. Тюремнов И.С. О разработке методологии прогнозирования технологических возможностей ударно-вибрационных грунтоуплотняющих машин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 9. С. 689–692. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-9-689-690>
27. Brandl H., Adam D. Sophisticated continuous compaction control of soils and granular materials // Proc., XIVth Intl. Conf. Soil Mech. Found. Eng. Vol. 1, Sept. Hamburg, Ger. 1997. P. 31–36.
28. Fang Z. et al. Dynamical response to vibration roller compaction and its application in intelligent compaction // Autom. Constr. 2022. Vol. 142. P. 104473. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104473>

## REFERENCES

1. 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.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-706-716>

2. Anderegg R., Dominik von Felten A., Kaufmann K. Compaction monitoring using intelligent soil compactors // *GeoCongress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age*. 2006; № Jönsson. P. 41.
3. SHishkin E. A., Smolyakov A.A. Obosnovanie sposoba regulirovaniya kontaktnogo usiliya vibratsionnogo val'tsa s uplotnyaemym materialom // *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. 2022; № 1(53). S. 36-42. <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2022-1-36-42>
4. Pistol J., Hager M., Kopf F., Adam D. Consideration of the Variable Contact Geometry in Vibratory Roller Compaction // *Infrastructures*. 2023; № 110 Vol. 8: 1-15. <https://doi.org/10.3390/infrastructures8070110>
5. Shabanova G.I., Savel'ev S.V., Buryy G.G. Matematicheskoe opisanie kolebatel'noy sistemy "vibratsionnyy rabochiy organ - grunt" // *Vestnik Sibirskoy gosudarstvennoy avtomobil'no-dorozhnoy akademii*. 2013; № 3(31):102-107. [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_19032661\\_60709817.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_19032661_60709817.pdf)
6. Susante P., Mooney M. Capturing Nonlinear Vibratory Roller Compactor Behavior through Lumped Parameter Modeling // *Journal of Engineering Mechanics*. 1996. P. 684–693. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2008\)134:8\(684\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2008)134:8(684))
7. Shishkin E.A., Smolyakov A.A. Modelirovanie vzaimodeystviya vibratsionnogo val'tsa dorozhnogo katka s uplotnyaemym gruntom // *Transportnoe, gornoe i stroitel'noe mashinostroenie: nauka i proizvodstvo*. 2024. № 26: 60-67. <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2024-26-60-67>[https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_19032661\\_60709817.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_19032661_60709817.pdf)
8. Tyuremnov I.S., Shorohov D.A. Vibrating roller with compacted soil interaction modeling. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024;21(2):202-216. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-202-216>.
9. Mikheyev V.V., Saveliev S.V. Modeling of properties of deformable soil media during compaction by cylindrical roller drums mathematical 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.) [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-2\(54\)-28-36](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-2(54)-28-36)
10. Dobrescu C. The dynamic response of the vibrating compactor roller, depending on the viscoelastic properties of the soil // *Applied System Innovation*. 2020;№ 2 (3):1-10. <https://doi.org/10.3390/asi3020025>
11. Dobrescu C. Comparative Analysis of the Voigt–Kelvin and Maxwell Models in the Compaction by Vibration Process // *Springer Proceedings in Physics*. 2021. - № 251. P. 359-366. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-54136-1\\_36](https://doi.org/10.1007/978-3-030-54136-1_36)
12. Lu Y., Liu J., Zhang J., Wang J. Research on vibratory & oscillatory coexistence nonlinear dynamics based on drum-subgrade coupling model // *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2023. Vol. 157: 104536. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2023.104536>
13. Adam D., Pistol 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 Ciclo*. 2016. № Ccc. P. 1–41.
14. Adam D., Kopf F. Operational Devices for Compaction Optimization and Quality Control (Continuous Compaction Control & Light Falling Weight Device) // *Proceedings of the International Seminar on Geotechnics in Pavement and Railway Design and Construction, Athens, Greece*. 2004. P. 97-106.
15. Anderegg R., Kaufmann K. Intelligent Compaction with Vibratory Rollers: feedback control systems in automatic compaction and compaction control // *Transportation Research*, Record No. 1868. Washington D. C. 2004. P. 124-134.
16. 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 // *Journal of Physics: Conference Series, Omsk*, 23–24 апреля 2019 года. Vol. 1260, 11. Omsk: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 112033. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1260/11/112033>
17. 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. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-396-416>
18. Tarasov V.N., Boyarkina I.V., Serebrennikov V.S. Analiticheskiy metod issledovaniya vertikal'nykh peremeshcheniy vibroval'tsa dorozhnogo katka pri uplotnenii materialov i gruntov // *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2019. № 7: 13-18.
19. 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.) [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2016-3\(49\)-99-105](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2016-3(49)-99-105)
20. Nosov S.V. Matematicheskoe modelirovanie dinamiki nazemnykh transportno-tehnologicheskikh sredstv pri vzaimodeystvii s deformiruемым опорным osnovaniem : Monografiya / Ministerstvo obrazovaniya i nauki rossiyskoy federatsii; lipetskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet. Lipetsk : Lipetskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2016. 164 s.
21. Mooney M., Rinehart R., Facas N., Musimbi O., White D. [и др.]. Intelligent Soil Compaction Systems. NCHRP Report 676 - Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2010. 178 p. [http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp\\_rpt\\_676.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_676.pdf)
22. Tyuremnov I.S., Furmanov D.V. Experimental studies of stresses in soil affected by a vibratory roller // *Journal of Physics: Conference Series : IV International Scientific and Technical Conference "Mechanical Science and Technology Update"*, MSTU 2020, Omsk, 17–19 марта 2020 года. Vol. 1546. Omsk: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 012144. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1546/1/012144>

23. Pistol J., Hager M., Adam D., Kopf F., Theoretical and experimental investigation of continuous compaction control (CCC) systems, 17th Nordic Geotechn. Meet. Challeng. Nordic Geotechnic 25 (2016) 865–872. [https://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat\\_249454.pdf](https://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_249454.pdf)

24. Tyuremnov I.S., Ignat'ev A.A. Uplotnenie gruntov vibratsionnymi katkami : monografiya Yaroslavl' : Izd-vo YAGTU, 2012. 140 s.

25. Tyuremnov I.S., Ignat'ev A.A. Raschiot raspredeleniya napryazheniy v gruntakh s lineynym zakonom izmeneniya plotnosti po glubine ot dinamicheskoy poverkhnostnoy nagruzki // *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*, 2013, № 1, s. 40–42.

26. Tyuremnov I.S. O razrabotke metodologii prognozirovaniya tekhnologicheskikh vozmozhnostey udarno-vibratsionnykh gruntuplotnyayushchikh mashin // *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2024. № 9. S. 689–692. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-9-689-690>

27. Brandl H., Adam D. Sophisticated continuous compaction control of soils and granular materials // Proc., XIVth Intl. Conf. Soil Mech. Found. Eng. Vol. 1, Sept. Hamburg, Ger. 1997. P. 31–36.

28. Fang Z. et al. Dynamical response to vibration roller compaction and its application in intelligent compaction // *Autom. Constr.* 2022. Vol. 142. P. 104473. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104473>

#### 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-код:** 9976-0728,

**e-mail:** [tyuremnovis@yandex.ru](mailto:tyuremnovis@yandex.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

*Tyuremnov Ivan S. – Candidate of Technical Science, Associate Professor, Head of the Construction and Road Machines Department, (88, Moskovsky Prospekt, Yaroslavl, 150023).*

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-2261-4153>,

**SPIN-code:** 9976-0728,

**e-mail:** [tyuremnovis@yandex.ru](mailto:tyuremnovis@yandex.ru)