

Научная статья

УДК 624.138.22

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

EDN: IGOKXE



# АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ УДАРНО-ВИБРАЦИОННЫХ ГРУНТОУПЛОТНЯЮЩИХ МАШИН

И.С. Тюремнов

ФГБОУ ВО «ЯГТУ»,

г. Ярославль, Россия

tyuremnovis@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2261-4153>

## АННОТАЦИЯ

**Введение.** Для механизации уплотнения грунтов в дорожном строительстве наибольшее распространение получили ударно-вибрационные машины, осуществляющие уплотнение с периодическим отрывом рабочего органа от грунта: самоходные нереверсивные и реверсивные виброплиты, вибротрамбовки, навесные экскаваторные виброплиты, траншейные вибрационные катки и грунтовые вибрационные катки. Для оценки возможности разработки математической модели уплотнения грунта, объединяющей сразу несколько типов ударно-вибрационных машин, необходимо проведение анализа основных технических характеристик ударно-вибрационных машин различных типов.

**Материалы и методы.** Для анализа использовались технические характеристики различных типов ударно-вибрационных машин: 342 модели нереверсивных самоходных виброплит; 312 моделей реверсивных самоходных виброплит; 311 моделей вибрационных грунтовых катков; 63 модели навесных виброплит для экскаваторов; 24 модели вибротрамбовок и 21 модель траншейных вибрационных катков. В качестве основного параметра была принята масса машины (для виброплит различных типов) или масса, приходящаяся на уплотняющий модуль (для вибрационных катков различных типов).

**Результаты.** Получены графические зависимости, показывающие, что для данных типов ударно-вибрационных машин вынуждающая сила, относительная вынуждающая сила и частота колебаний зависят на взаимно сопрягающихся и продолжающихся участках кривых, укладывающихся в общую закономерность: с увеличением массы машины, увеличивается вынуждающее усилие, но уменьшается относительное вынуждающее усилие и частота колебаний. Вибротрамбовки выбиваются из этой общей закономерности, поскольку при сопоставимой массе имеют существенно меньшую частоту колебаний (9...12 Гц) и высокую амплитуду (50...75 мм). Также из общей закономерности выделяются навесные экскаваторные виброплиты, имеющие меньший диапазон частот колебаний для машин аналогичной массы, к тому же осуществляющих уплотнение грунта позиционно, а не в процессе движения с определенной скоростью, как остальные ударно-вибрационные машины.

**Обсуждение и заключение.** Наличие общей закономерности изменения основных технических характеристик самоходных нереверсивных и реверсивных виброплит, траншейных катков и грунтовых вибрационных катков при близкой номинальной амплитуде их колебаний даёт основания для разработки единого теоретического описания взаимодействия рабочих органов данных типов машин с уплотняемым грунтом и общей методики расчета влияния технических характеристик и режимов работы данных машин на результаты уплотнения грунта.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** грунт, уплотнение, вибрация, машины ударно-вибрационные, каток вибрационный, каток траншейный, вибротрамбовка, виброплита, вынуждающее усилие, относительное вынуждающее усилие, частота колебаний

**БЛАГОДАРНОСТИ:** автор выражает благодарность Ефимову Сергею Сергеевичу, Федоровой Дарье Владимировне и Шорохову Дмитрию Александровичу за помощь в сборе информации о технических характеристиках грунтоуплотняющих машин, а также рецензентам.

Статья поступила в редакцию 8.10.2023; одобрена после рецензирования 24.10.2023; принята к публикации 20.12.2023.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

© Тюремнов И.С., 2023

Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Тюрёмнов 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>

Origin article

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

EDN: IGOKXE

## TECHNICAL PARAMETERS ANALYSES OF DIFFERENT TYPES OF IMPACT-VIBRATION SOIL COMPACTING MACHINES

Ivan S. Tyuremnov

Yaroslavl State Technical University,  
Yaroslavl, Russia

[tyuremnovis@yandex.ru](mailto:tyuremnovis@yandex.ru), <http://orcid.org/0000-0003-2261-4153>

### ABSTRACT

**Introduction.** Impact-vibration machines, which perform soil compaction with periodic removal of the working body from the ground, are the most common for mechanization of soil compaction in road construction: self-propelled non-reversible and reversible vibratory plates, vibratory rammers, mounted excavator vibratory plates, trench vibratory rollers and soil vibratory rollers. It is necessary to analyze the main technical characteristics of impact-vibration machines of different types in order to assess the possibility of developing a mathematical model of soil compaction, combining several types of impact-vibration machines at once.

**Materials and methods.** The technical characteristics of different types of impact-vibration machines for the analysis: 342 models of non-reversible self-propelled vibratory plates; 312 models of reversible self-propelled vibratory plates; 311 models of vibratory ground rollers; 63 models of mounted vibratory plates for excavators; 24 models of vibratory rammers and 21 models of trench vibratory rollers are used. The machine mass (for vibratory plates of different types) or the mass per compaction module (for vibratory rollers of different types) was taken as a main parameter.

**Results.** The graphical dependencies have been obtained. They illustrate that for the given types of shock-vibration machines the excitation force, relative excitation force and oscillation frequency are located on mutually contiguous and continuing parts of curves. This is a common pattern: as the mass of the machine increases, the excitation force increases, but the relative excitation force and frequency of oscillation decrease. Vibratory rammers are out of this general pattern, because at comparable weight they have significantly lower frequency of oscillation (9...12 Hz) and high amplitude (50...75 mm). Also, the mounted excavator vibratory plates stand out from the general pattern, having a smaller range of vibration frequencies for machines of similar weight, moreover, they perform soil compaction positionally, and not in the process of movement at a certain speed, as other impact-vibration machines.

**Discussion and conclusions.** The common pattern of changes in the main technical characteristics of self-propelled non-reversible and reversible vibratory plates, trench rollers and soil vibratory rollers at close nominal amplitude of their vibrations gives grounds for the development of a unified theoretical description of the interaction of the working bodies of these types of machines with the compacted soil and a common method of calculating the influence of technical characteristics and operating modes of these machines on the results of soil compaction.

**KEYWORDS:** soil, compaction, vibration, shock-vibration machines, vibratory roller, trench roller, vibratory rammer, vibratory plate, excitation force, relative excitation force, frequency of vibrations

The article was submitted 8.10.2023; approved after reviewing 24.10.2023; accepted for publication 20.12.2023.

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

© Tyuremnov I. S., 2023



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

## ВВЕДЕНИЕ

Уплотнение грунтов является ключевой составляющей<sup>1,2,3</sup> повышения прочности, устойчивости и несущей способности инженерных сооружений, возведенных на грунтах или с использованием грунта: автомобильных и железных дорог, насыпей и плотин, взлётно-посадочных полос и др. Уплотнение грунтов необходимо и в случае применения химических добавок для улучшения комплекса характеристик грунта (технологий упрочнения грунта и стабилизации грунта)<sup>1,4</sup> [5].

Для механизации уплотнения грунтов в дорожном строительстве применяются различные средства статического, вибрационного, ударно-вибрационного и ударного действия<sup>5</sup>. Грунтоуплотняющие машины (далее ГУМ) статического действия воздействуют на грунт только статическим весом рабочего органа или всей машины. Вибрационные и ударно-вибрационные ГУМ используют кроме статической составляющей и динамическую составляющую, периодически изменяющуюся во времени. Грунтоуплотняющие машины ударного действия используют ударные воздействия высокой интенсивности с интервалом времени, существенно превышающим продолжительность отдельных воздействий.

Отличием рабочего процесса ударно-вибрационных грунтоуплотняющих машин (далее УВ ГУМ) от вибрационных является периодический отрыв рабочего органа (далее РО) от грунта под действием вынуждающей силы вибровозбудителя. Исследованиями Н.Я. Хархута<sup>6</sup> установлены критические значения относительного вынуждающего усилия для различных частот колебаний вибровозбудителей УВ ГУМ, при которых в процессе колебаний начинает наблюдаться периодический отрыв их рабочего органа от грунта и вибрационный

режим работы сменяется ударно-вибрационным (таблица 1). Под относительной вынуждающей силой понимается отношение вынуждающей силы  $P$  вибровозбудителя РО к весу машины  $Q$  (для виброплит различного типа) или к весу  $Q_{\text{в}}$ , приходящемуся на уплотняющий модуль (для вибрационных катков, в т.ч. траншейных).

Таблица 1

Критические значения относительной вынуждающей силы  $P/Q$  ( $P/Q_{\text{в}}$ ) для различных частот колебаний<sup>6</sup>

Table 1

Critical values of  $P/Q$  ( $P/Q_{\text{в}}$ ) relative excitation forces for different vibration frequencies<sup>6</sup>

| Параметр                                        | Значения |         |           |
|-------------------------------------------------|----------|---------|-----------|
| Частота колебаний, Гц                           | 12...25  | 25...50 | 50...85   |
| Критические значения $P/Q$ ( $P/Q_{\text{в}}$ ) | 0,7...1  | 1...1,4 | 1,4...2,3 |

Наибольшее распространение в дорожном строительстве получили машины, осуществляющие уплотнение с поверхности грунта: самоходные виброплиты (неревверсивные и реверсивные); вибротрамбовки; навесные виброплиты (для гидравлических экскаваторов); траншейные вибрационные катки и грунтовые вибрационные катки. Данные типы УВ ГУМ существенно отличаются друг от друга геометрией рабочего органа (плоская форма поверхности контакта РО с грунтом у самоходных виброплит, экскаваторных виброплит и вибротрамбовок и цилиндрическая у траншейных и вибрационных катков), по мобильности в процессе выполнения работ (позиционное уплотнение грунта у экскаваторных виброплит и передвижение в процессе выполнения работы остальных типов УВ ГУМ), по конструкции и др.

<sup>1</sup> Хархута Н.Я., Васильев Ю.М. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1975. 288 с.

<sup>2</sup> Хархута Н.Я. Машины для уплотнения грунтов. Л.: Машиностроение, 1973. 176 с.

<sup>3</sup> Костельов М.П. Опять о качестве и эффективности уплотнения различных грунтов современными виброкатками // Дорожная техника. Каталог-справочник. 2008. С. 40–47. <https://elibrary.ru/item.asp?id=30463315>

<sup>4</sup> Николева Г.О., С.С. П. Исследование физико-механических характеристик стабилизированного грунта, применяемого в конструкции дорожных одежд автомобильных дорог в условиях I дорожно-климатической зоны // Транспортные системы: безопасность, новые технологии, экология: сборник трудов II международной научно-практической конференции, Якутск, 16–17 апреля 2020 года. Якутск: Якутский институт водного транспорта (филиал) Федерального государственного бюджетн. 2020. С. 126–132. <https://elibrary.ru/item.asp?id=44498034>

<sup>5</sup> Неклюдов М. Механизация уплотнения грунтов. 2-е изд. М.: Стройиздат, 1985. 168 с.

<sup>6</sup> Хархута Н.Я. Дорожные машины. Теория конструкция и расчет: учебник для вузов. Изд. 2-е., Л: Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1976. 472 с.

Для каждого типа УВ ГУМ существуют проблемы обоснования технических характеристик при проектировании, а также подбора модели УВ ГУМ и назначения режимов её работы (например, числа проходов) при производстве работ по уплотнению грунта в конкретных технологических условиях. Для решения данных проблем исследователи разрабатывают математические модели взаимодействия элементов УВ ГУМ между собой и с уплотняемым грунтом с учетом особенностей конструкции и технологии применения конкретного типа УВ ГУМ: самоходных виброплит [2], [3], вибротрамбовок [4], [11], вибрационных катков<sup>7</sup> [6], [13], [15], [16], [17], [18] и др. Для оценки возможности разработки математической модели уплотнения грунта УВ ГУМ общей для нескольких типов УВ ГУМ необходимо проведение анализа технических характеристик различных типов УВ ГУМ.

В литературе приводятся исследования взаимосвязи основных технических характеристик некоторых отдельных типов УВ ГУМ: самоходных виброплит ([12], [20], [21], [22]), навесных экскаваторных виброплит [16], вибрационных грунтовых катков [17] и асфальтовых катков [18] (могут применяться для уплотнения крупнообломочных грунтов и каменных материалов). Однако исследований, рассматривающих характеристики сразу всех основных типов УВ ГУМ при анализе литературы, не было выявлено.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основными техническими характеристиками УВ ГУМ, определяющими их силовое воздействие на уплотняемый грунт, являются: масса  $M$  (кг), вынуждающая сила  $P$  (кН) и частота колебаний  $f$  (Гц). При этом для вибрационных катков (в т.ч. траншейных) для оценки силового воздействия следует рассматривать только массу, приходящуюся на уплотняющий модуль  $M_v$ , поскольку часть массы машины, приходящаяся на тяговый модуль, не участвует в формировании уплотняющего воздействия, передаваемого вальцом катка на грунт, а служит только для обеспечения передвижения машины. Кроме абсолютного значения вынуждающей силы  $P$ , необходимо рассматривать относительную вынуждаю-

щую силу, определяемую как отношение вынуждающей силы вибровозбудителя УВ ГУМ к весу машины  $Q$  (для виброплит различного типа) или к весу  $Q_v$ , приходящемуся на уплотняющий модуль (для вибрационных катков различных типов, в т.ч. траншейных), т.е.  $P/Q$  или  $P/Q_v$ .

Для анализа использовались технические характеристики различных типов УВ ГУМ:

- 342 модели нереверсивных самоходных виброплит отечественных (АО «МОТОПРОМ», ООО «РАСТОМ», СПЛИТСТОУН, АО «СММ», РАСКАТ, МИКОМ, ТЕХКОМ) и зарубежных (AMMANN, BOMAG, MBW, WEBER, DYNAPAC, NTC, VIBROMAX, WACKER, MIKASA, TREMIX, GROST, VEKTOR, SAMSAN, ZITREK, BATMATIC, BELLE, CHICAGO PNEUMATIC, DELTA, DIAM, ENAR, EURO SHATAL, FIRMAN, HELMUT, HUSQVARNA, IMPULSE, MASTERPAC, SOVTE, STEM TECHNO, TSS, ТЕКРАС, TREMMER, TSUNAMI) производителей;

- 312 моделей реверсивных самоходных виброплит отечественных (АО «МОТОПРОМ», ООО «РАСТОМ», СПЛИТСТОУН, АО «СММ», РАСКАТ, МИКОМ, ТЕХКОМ) и зарубежных (AMMANN, BOMAG, WEBER, DYNAPAC, NTC, WACKER, VIBROMAX, MIKASA, TREMIX, GROST, VEKTOR, SAMSAN, BATMATIC, CHICAGOPNEUMATIC, DIAM, EUROSHATAL, FIRMAN, HELMUT, HUSQVARNA, IMPULSE, MASTERPAC, STEMTECHNO, TSS, ТЕКРАС, TREMMER) производителей;

- 311 моделей вибрационных грунтовых катков отечественных (АМКОДОР, Завод дорожных машин, РАСКАТ, Челябинский тракторный завод - УРАЛТРАК) и зарубежных (AMMANN, ATLAS WEYCOR, BOMAG, CATERPILLAR, DYNAPAC, HAMM, JCB, VOLVO, MITSUBISHI, HONGSHEENWA, GUANGXI LIUGONG, LUTONG, SAKAI, SHANDONG CHANGLIN, XCMG, YTO INTERNATIONAL, XIAMEN XGMA, ZOOMLION) производителей;

- 63 модели навесных виброплит для экскаваторов отечественных (ТРАДИЦИЯ-К, IMPULSE) и зарубежных (GHEDINI, AMMANN, SIMEX, INDECO, EXTEN, ATLAS COPCO, LST, GENTEC EQUIPMENT) производителей;

- 24 модели вибротрамбовок (AMMANN, Atlas Copco, BOMAG, WEBER, Grost, Vektor);

<sup>7</sup> Савельев С.В., Бурый Г.Г., Аднагулова З.Р. Методика обоснования параметров вибрационных катков для уплотнения грунтовых насыпей, учитывающая зону активного действия вибрации // В сборнике Образование. Транспорт. Инновации. Строительство. Сборник материалов III Национальной научно-практической конференции. 2020. С. 54–60. <https://elibrary.ru/item.asp?id=43970005>



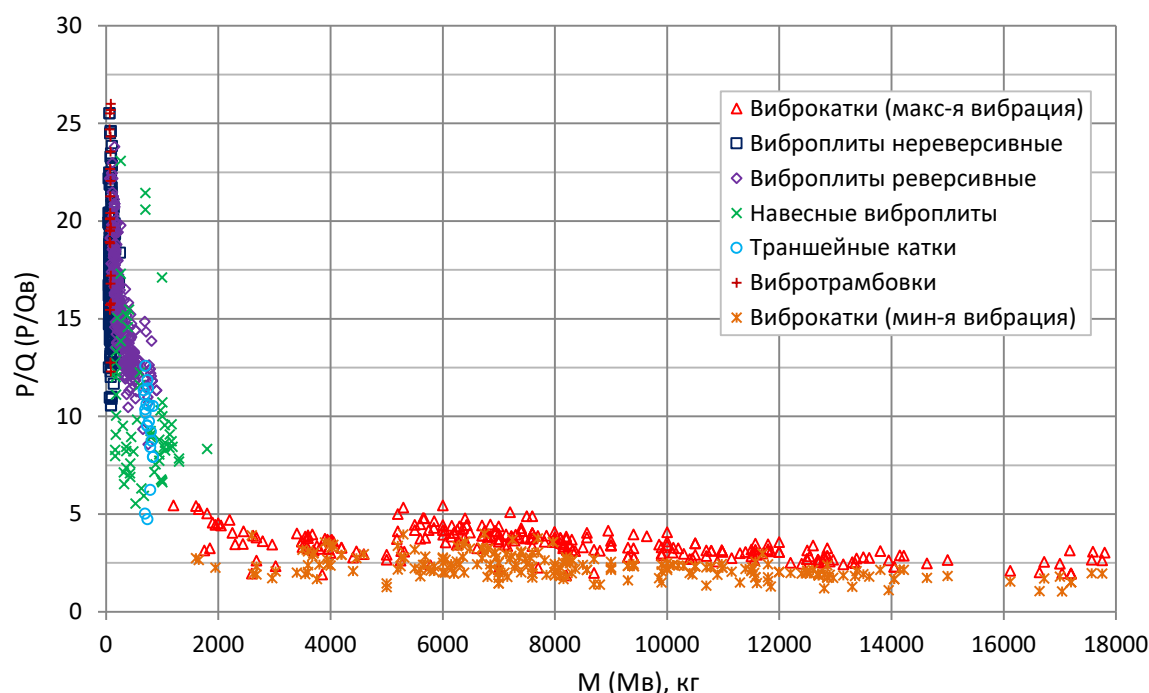


Рисунок 1 – Влияние массы грунтоуплотняющей машины ( $M$ , кг) или массы рабочего органа грунтоуплотняющей машины ( $M_v$ , кг) на значения относительной вынуждающей силы ( $P/Q$  или  $P/Q_v$ )  
Источник: составлено автором.

Figure 1 – Impact of the soil compacting machine mass ( $M$ , kg) or soil compacting machine implement mass ( $M_v$ , kg) on the values of the relative excitation force ( $P/Q$  or  $P/Q_v$ )  
Source: compiled by the author.

– 21 модель траншейных вибрационных катков (AMMANN, ATLASCOPO, BOMAG, WACKER, WEBER, GROST, HUSQVARNA, CHICAGOPNEUMATIC, JCB, TORO, SAKAI).

Технические характеристики УВ ГУМ брались из каталогов и официальных сайтов производителей и дистрибьюторов УВ ГУМ.

В качестве основного параметра ГУМ была принята масса  $M$  (для виброплит различных типов) или масса, приходящаяся на уплотняющий модуль  $M_v$  (для вибрационных катков различных типов). Поскольку у большинства моделей вибрационных катков предусмотрено два стандартных режима вибрации (режим «максимальной вибрации» (повышенное значение вынуждающей силы при пониженной частоте колебаний) и режим «минимальной вибрации» (пониженное значение вынуждающей силы при повышенной частоте колебаний)), то на графиках приведены данные для обоих режимов по отдельности.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Результирующие данные влияния массы УВ ГУМ ( $M$ , кг) или РО ГУМ ( $M_v$ , кг) на значения относительной вынуждающей силы ( $P/Q$  или  $P/Q_v$ ), вынуждающей силы  $P$ , а также частоты колебаний  $f$  для различных типов УВ ГУМ представлены на рисунках 1, 2, 3, 4, 5, 6.

Анализ графиков (см. рисунки 1, 2, 3, 4, 5, 6) показывает, что технические характеристики УВ ГУМ, определяющие их силовое воздействие на уплотняемый грунт (вынуждающая сила, относительная вынуждающая сила и частота колебаний) находятся в определенной зависимости от массы машины (рабочего органа).

Для самоходных виброплит (как нереверсивных, так и реверсивных), навесных экскаваторных виброплит, траншейных катков и грунтовых вибрационных катков вынуждающая сила, относительная вынуждающая сила и частота колебаний располагаются на взаимно сопрягающихся и продолжающихся участках кривых, укладывающихся в общую закономерность. Наибольшие значения относительной вынуждающей силы и частоты колебаний имеют УВ ГУМ малой массы (нереверсивные виброплиты и лёгкие модели реверсивных виброплит) (см. рисунки 1, 2). Наименьшие значения относительной вынуждающей силы и частоты колебаний из всех типов УВ ГУМ имеют вибрационные катки, обладающие наибольшей массой (приходящейся на уплотняющий модуль).

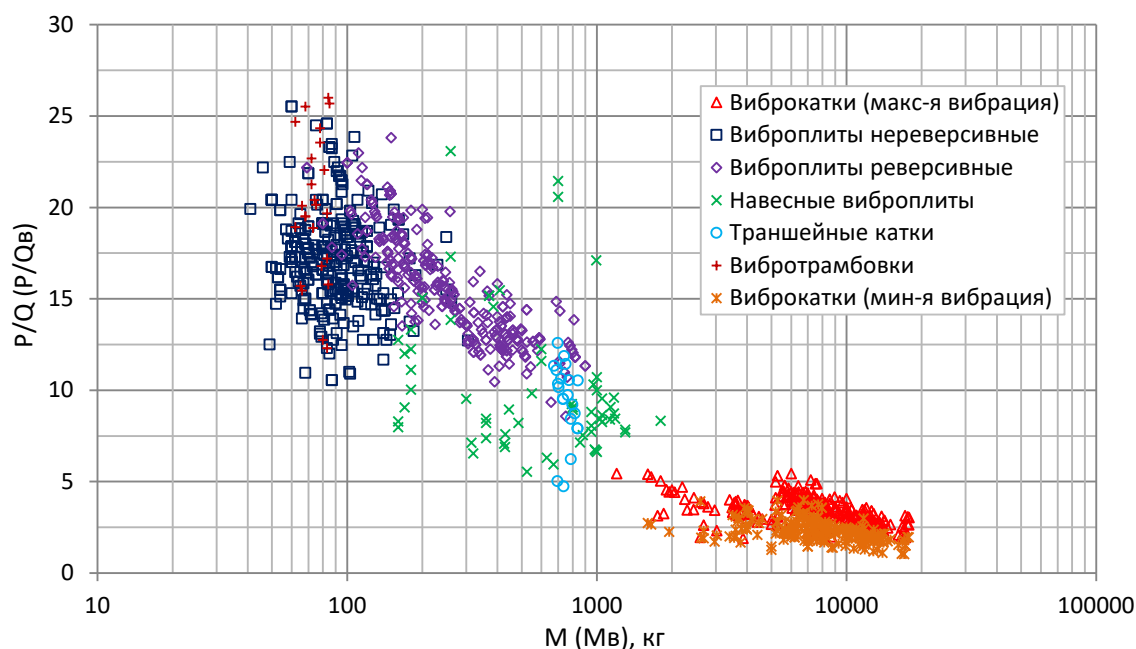


Рисунок 2 – Влияние массы грунтоуплотняющей машины ( $M$ , кг) или рабочего органа грунтоуплотняющей машины ( $M_v$ , кг) на значения относительной вынуждающей силы ( $P/Q$  или  $P/Q_v$ ) (в полупологарифмических координатах)  
Источник: составлено автором.

Figure 2 – Impact of the soil compacting machine mass ( $M$ , kg) or the soil compacting machine working organ ( $M_v$ , kg) on the values of the relative excitation forces ( $P/Q$  or  $P/Q_v$ ) (in semi-logarithmic coordinates)  
Source: compiled by the author.

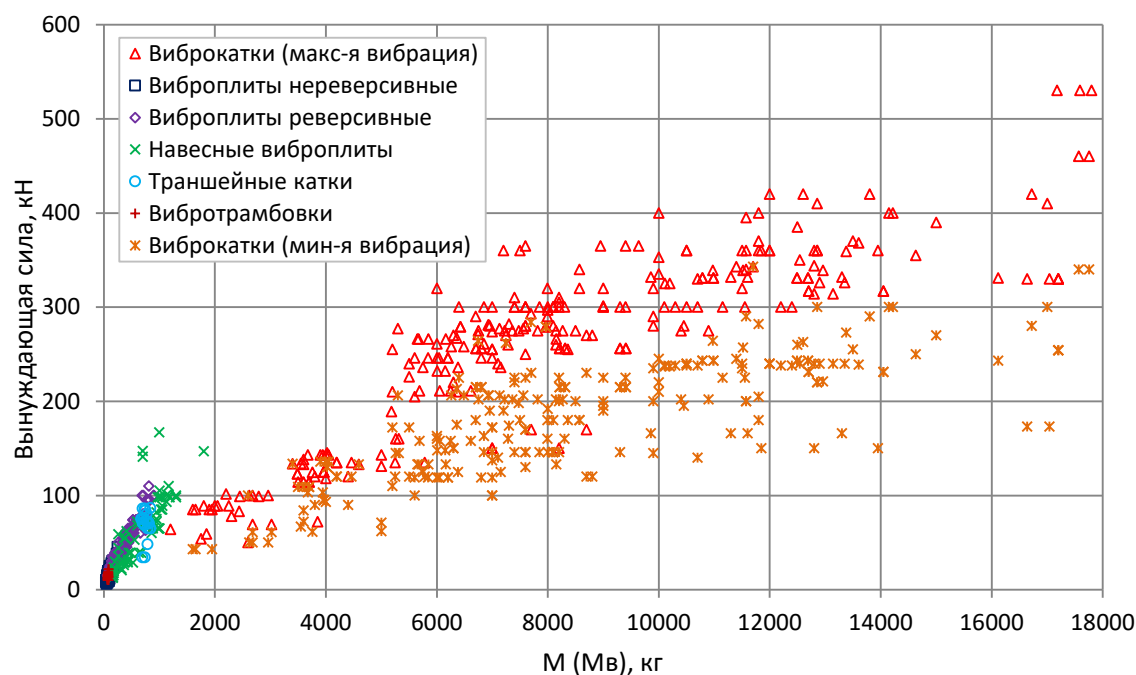


Рисунок 3 – Влияние массы грунтоуплотняющей машины ( $M$ , кг) или рабочего органа грунтоуплотняющей машины ( $M_v$ , кг) на значения вынуждающей силы колебаний  
Источник: составлено автором.

Figure 3 – Impact of the soil compacting machine mass ( $M$ , kg) or the soil compacting machine working body ( $M_v$ , kg) on the values of the excitation forces of oscillation  
Source: compiled by the author.

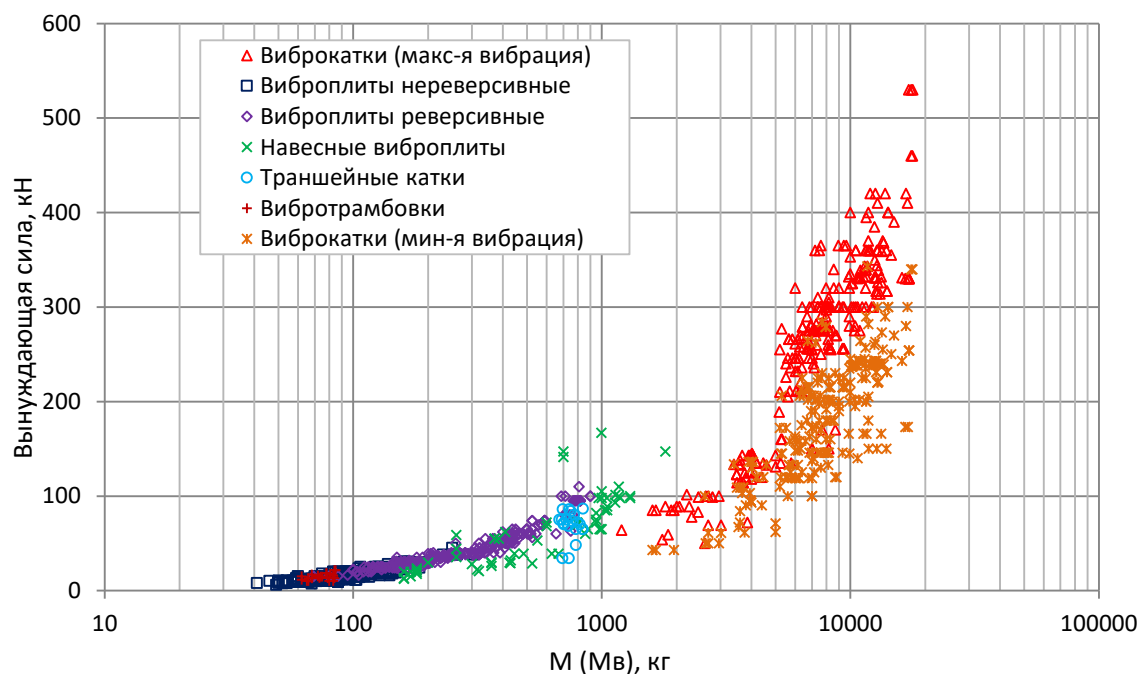


Рисунок 4 – Влияние массы грунтоуплотняющей машины ( $M$ , кг) или рабочего органа грунтоуплотняющей машины ( $M_r$ , кг) на значения вынуждающей силы колебаний (в полулогарифмических координатах)  
Источник: составлено автором.

Figure 4 – Impact of the soil compacting machine mass ( $M$ , kg) or soil compacting machine working organ ( $M_r$ , kg) on the values of the excitation forces of oscillations (in semi-logarithmic coordinates)  
Source: compiled by the author.

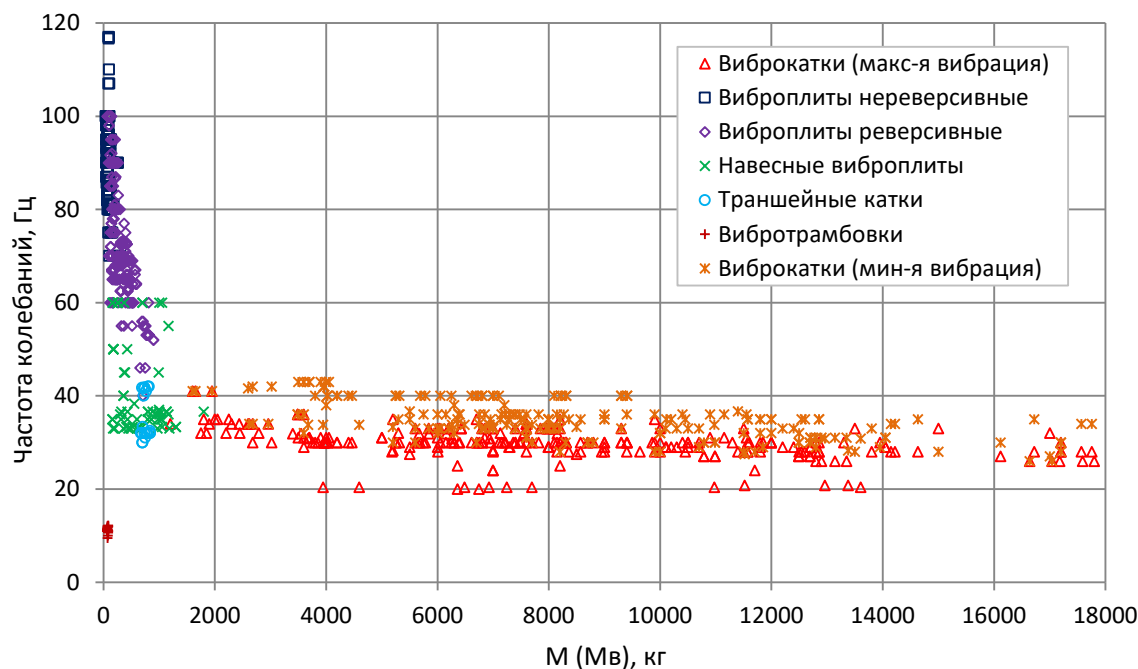


Рисунок 5 – Влияние массы грунтоуплотняющей машины ( $M$ , кг) или рабочего органа грунтоуплотняющей машины ( $M_r$ , кг) на значения частоты колебаний  
Источник: составлено автором.

Figure 5 – Impact of the soil compacting machine mass ( $M$ , kg) or the soil compacting machine working body ( $M_r$ , kg) on the vibration frequency values  
Source: compiled by the author.

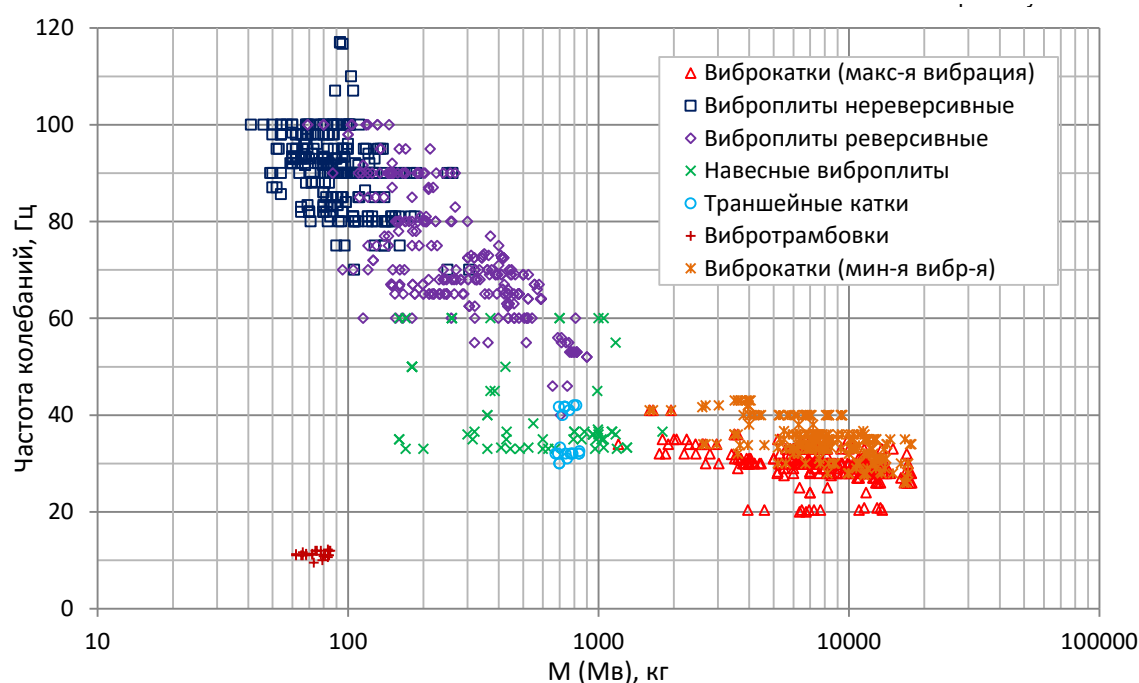


Рисунок 6 – Влияние массы грунтоуплотняющей машины ( $M$ , кг) или рабочего органа грунтоуплотняющей машины ( $M_p$ , кг) на значения частоты колебаний (в полулогарифмических координатах)  
Источник: составлено автором.

Figure 6 – Impact of soil compacting machine mass ( $M$ , kg) or soil compacting machine working organ ( $M_p$ , kg) on vibration frequency values (in semi-logarithmic coordinates)  
Source: compiled by the author.

Траншейные виброкатки занимают промежуточное положение как по массе, приходящейся на уплотняющий модуль, так и по относительной вынуждающей силе и частоте колебаний. Диапазоны изменения вынужда-

ющей силы, относительной вынуждающей силы и частоты колебаний для различных ГУМ приведены в таблице 2. Грунтоуплотняющие машины в таблице 2 расположены в порядке увеличения их масс.

Таблица 2  
Диапазоны изменения основных технических характеристик ударно-вибрационных грунтоуплотняющих машин  
Источник: составлено автором.

Table 2  
Ranges of variation of the main technical characteristics for impact-vibration soil compacting machines  
Source: compiled by the author.

| Параметр                                                                                                            | Самоходные виброплиты |              | Вибро-трамбовки | Навесные вибро-плиты | Траншей-ные вибро-катки | Вибра-ционные катки   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|--------------|-----------------|----------------------|-------------------------|-----------------------|
|                                                                                                                     | неревер-сивные        | ревер-сивные |                 |                      |                         |                       |
| Масса плиты (М) или виброкатка (М <sub>в</sub> ), кг                                                                | 40...900              |              | 62...85         | 160...1800           | 675...840               | 1200...<br>...17800   |
|                                                                                                                     | 41...305              | 69...900     |                 |                      |                         |                       |
| Относительная вынуждающая сила P/Q (P/Q <sub>в</sub> )                                                              | 8,6...25,5            |              | 12,3...26       | 5,5...23             | 4,7...11,9              | 1,9...5,4*<br>1...4** |
|                                                                                                                     | 10,6...25,5           | 8,6...23,8   |                 |                      |                         |                       |
| Частота колебаний, Гц                                                                                               | 40...117              |              | 9...12          | 33...60              | 30...42                 | 20...41*<br>26...43** |
|                                                                                                                     | 60...117              | 40...100     |                 |                      |                         |                       |
| * Режим «максимальной вибрации» для вибрационных катков;<br>** Режим «минимальной вибрации» для вибрационных катков |                       |              |                 |                      |                         |                       |



Вибротрамбовки выбиваются из этой общей закономерности, поскольку, хотя и укладываются в общую закономерность по значениям вынуждающей силы и относительной вынуждающей силы колебаний, имеют частоты колебаний (9...12 Гц) существенно меньшие, чем ударно-вибрационные машины сопоставимой массы (см. рисунок 6 и таблицу 2). Также следует отметить, что номинальная амплитуда колебаний вибротрамбовок (по техническим характеристикам) находится в диапазоне 50...75 мм, что существенно превышает паспортные диапазоны амплитуд колебаний РО других УВ ГУМ (нереверсивных и реверсивных виброплит, траншейных катков и грунтовых вибрационных катков (данные по номинальной амплитуде колебаний навесных экскаваторных виброплит производителями не приводятся)).

Также несколько выбиваются из общей закономерности навесные виброплиты. Диапазон частот колебаний навесных экскаваторных виброплит располагается несколько ниже диапазона частот колебаний реверсивных виброплит сопоставимой массы. При этом навесные виброплиты, в отличие от других анализируемых УВ ГУМ (нереверсивных и реверсивных виброплит, вибротрамбовок, траншейных катков и грунтовых вибрационных катков), работают позиционно, крепясь на рукояти экскаватора и осуществляя уплотнение грунта без передвижения по его поверхности, что существенным образом будет влиять на математическую модель непрерывного накопления деформации на различных глубинах грунта в процессе достаточно длительного виброударного воздействия (по сравнению со сравнительно небольшой продолжительностью воздействия на поверхность грунта УВ ГУМ, передвигающихся над точкой поверхности с определенной скоростью в течение отдельного прохода).

Анализ представленных результатов (рисунки 1, 2, 3, 4, 5, 6, таблица 2) показывает, что для всех типов рассматриваемых ГУМ значения относительной вынуждающей силы при соответствующем диапазоне частот колебаний превышают критические значения  $P/Q$  ( $P/Q_c$ ) (см. таблицу 1), что свидетельствует об отрывном характере колебаний всех рассматриваемых ГУМ и необходимости отнесения их к ударно-вибрационным (виброударным) ГУМ. Данное обстоятельство является существенным и требует обязательного учета в математических моделях взаимодействия УВ ГУМ данных типов с грунтом.

Реализация вибрационного режима колебаний, при котором рабочие органы ГУМ не отрываются от грунта, возможна только на первых проходах, когда грунт находится в начальной стадии уплотнения. По мере уплотнения грунта режим колебаний современных ГУМ переходит в тот или иной вариант отрывных колебаний. Для вибрационных катков зарубежные исследователи рассматривают следующие основные виды колебаний [19]: «постоянный контакт» («continuous contact»), «частичный отрыв» («partial uplift»), «двойной прыжок» («double jump») и более сложные виды колебаний типа «раскачивание» («rocking motion») и «хаотический» («chaotic motion»). Причем наиболее эффективное уплотнение грунта вибрационным катком осуществляется в режиме «частичный отрыв» («partial uplift»). Режимы «двойной прыжок», «раскачивание» и «хаотический» являются нежелательными и даже опасными. Для своевременной индикации перехода в данные режимы колебаний и отстраивания от них применяются системы непрерывного контроля уплотнения грунтов, устанавливаемые на УВ ГУМ [20]. Таким образом, математическая модель взаимодействия УВ ГУМ с грунтом должна иметь возможность учета реализации как безотрывного режима колебаний типа «постоянный контакт» («continuous contact») (соответствующему классическому вибрационному нагружению грунта), так и различных режимов с периодическим отрывом рабочего органа УВ ГУМ от грунта (соответствующему классическому виброударному нагружению грунта).

## ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ основных технических характеристик УВ ГУМ, определяющих их силовое воздействие на уплотняемый грунт (вынуждающая сила, относительная вынуждающая сила и частота колебаний) показывает, что технические характеристики нереверсивных виброплит, реверсивных виброплит, траншейных катков и грунтовых вибрационных катков находятся в рамках общей закономерности: с увеличением массы машины увеличивается вынуждающее усилие, но уменьшается относительное вынуждающее усилие и частота колебаний. При этом номинальная амплитуда колебаний (определяемая сочетанием массы рабочего органа, массы рамы, частотой и вынуждающей силой колебаний, характеристиками амортизаторов РО и свойствами грунта) для нереверсивных виброплит, реверсивных виброплит, траншейных катков и грунтовых вибрационных катков находится в одинако-

вом диапазоне (порядка нескольких миллиметров). Это даёт основания для разработки единого теоретического описания взаимодействия рабочих органов данных типов УВ ГУМ с уплотняемым грунтом и общей методики расчета влияния технических характеристик и режимов работы данных машин на результаты уплотнения грунта. Поскольку для нереверсивных виброплит, реверсивных виброплит, траншейных катков и грунтовых вибрационных катков значения относительной вынуждающей силы колебаний (при рабочей частоте колебаний) больше 1 (находятся в диапазоне 2...30), методика расчета должна учитывать реализацию режимов работы рабочего органа данных ГУМ как без отрыва, так и с отрывом от грунта.

Самоходные виброплиты и вибрационные катки находятся на противоположных краях диапазонов изменения характеристик УВ ГУМ по основным характеристикам, определяющим силовые возможности ГУМ (масса, относительное вынуждающее усилие и частота колебаний). Другие типы УВ ГУМ находятся внутри этого диапазона. Поэтому разработка методики расчета влияния технических характеристик УВ ГУМ на результаты уплотнения грунта в конкретных технологических условиях для самоходных виброплит и вибрационных катков должна быть применима и для УВ ГУМ внутри этого диапазона (в первую очередь траншейных вибрационных катков) с учетом их конструктивных особенностей (соотношения массы рабочего органа и массы рамы, количества и характеристик амортизаторов РО и др).

Достаточно большой диапазон изменения значений частоты и относительной вынуждающей силы колебаний РО УВ ГУМ различных типов при сопоставимой массе машин свидетельствует об отсутствии у производителей единого мнения о требуемых характеристиках УВ ГУМ и влиянии вынуждающей силы и частоты колебаний на эффективность уплотнения грунтов в различных условиях производства работ.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Худайкулов Р.М., Мирзаев Т.Л. Применение стабилизаторов для улучшения прочности грунтового основания автомобильных дорог // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». 2019. № 1–11.
2. Hashimoto T., Fujino K., Tateyama K. Suggestion of the ground stiffness estimative method with the running speed of a plate compactor // ISARC 2016 - 33rd Int. Symp. Autom. Robot. Constr. 2016. № Isarc. P. 421–427.
3. Emelianov R.T. et al. Modeling of dynamic system “vibratory plate-soil” as an object quality control of compaction // J. Phys. Conf. Ser. 2019. Vol. 1399, № 4.
4. Carmen D. Non-linear Behaviour of a Soil Compaction Equipment // 5th Int. Vilnius Conf. “Knowledge-Based Technol. OR Methodol. Strateg. Decis. Sustain. Dev. Sept. 30–October 3, 2009, Vilnius, Lith. 2009. № August 2009. P. 114–119.
5. Morariu-Gligor R.M. The Study of the Dynamic Behavior for a Tamping Rammer // Symmetry (Basel). 2022. Vol. 14, № 5.
6. Pistol J. et al. Consideration of the Variable Contact Geometry in Vibratory Roller Compaction // Infrastructures. 2023. Vol. 8, № 110. P. 1–15.
7. 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. P. 13–18.
8. 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). P. 99–105.
9. Pietzsch D., Poppy W. Simulation of soil compaction with vibratory rollers // J. Terramechanics. 1993. № 29(6). P. 585–597.
10. Li S., Hu C. Study on Dynamic Model of Vibratory Roller - Soil System // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 113, № 1.
11. Liu L. et al. Nonlinear Dynamics of the Rigid Drum for Vibratory Roller on Elastic Subgrades // Shock Vib. 2021. Vol. 2021. P. 1–9.
12. Евсеев Е.Ю., Куприянов Р.В., Зубков А.Ф. Анализ применения вибрационных плит для ремонта дорожных покрытий нежесткого типа // Механизация строительства. 2011. № 6(804). P. 28–31.
13. Мусияко Д.В., Расулов Р.А. Самоходная вибрационная плита с вальцем // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2016. № 4(43). P. 73–80.
14. Кузьмичев В.А., Кузьмичев В.Д. Исследование рабочих параметров самоходных виброплит, применяемых при уплотнении грунтов // Вестник гражданских инженеров. 2011. № 3(28). P. 66–71.
15. Тюремнов И.С., Новичихин А.А. Статистический анализ технических характеристик вибрационных плит // Механизация строительства. 2014. № 11. P. 32–35.
16. Тюремнов И.С., Федорова Д.В. Статистический анализ технических характеристик навесных экскаваторных виброплит // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2019. Vol. 16, № 2(66). P. 122–133.
17. Тюремнов И.С., Игнатьев А.А., Филатов И.С. Статистический анализ технических характеристик грунтовых вибрационных катков // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2014. № 3(34). P. 81–88.
18. Шишкин Е.А. et al. Исследование взаимосвязи конструктивных и технологических параметров вибрационных и осцилляционных катков // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2021. № 2. P. 183–188.
19. 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.

20. 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). P. 115–122.

## REFERENCES

1. KHudaykulov R.M., Mirzaev T.L. Primenenie stabilizatorov dlya uluchsheniya prochnosti gruntovogo osnovaniya avtomobil'nykh dorog [The use of stabilizers to improve the strength of the soil foundation of highways]. *Internet-zhurnal «Transportnye sooruzheniya»*. 2019;1–11. (in Russ.)

2. Hashimoto T., Fujino K., Tateyama K. Suggestion of the ground stiffness estimative method with the running speed of a plate compactor. ISARC 2016 - 33rd Int. Symp. Autom. Robot. Constr. 2016. № Isarc.: 421–427.

3. Emelyanov R.T. et al. Modeling of dynamic system “vibratory plate-soil as an object quality control of compaction. J. Phys. Conf. Ser. 2019; Vol. 1399, № 4.

4. Carmen D. Non-linear Behaviour of a Soil Compaction Equipment // 5th Int. Vilnius Conf. “Knowledge-Based Technol. OR Methodol. Strateg. Decis. Sustain. Dev. Sept. 30–October 3, 2009, Vilnius, Lith. 2009; August 2009: 114–119.

5. Morariu-Gligor R.M. The Study of the Dynamic Behavior for a Tamping Rammer. *Symmetry (Basel)*. 2022; Vol. 14, № 5. <https://www.mdpi.com/2073-8994/14/5/980>

6. Pistol J. et al. Consideration of the Variable Contact Geometry in Vibratory Roller Compaction. *Infrastructures*. 2023; Vol. 8, № 110: 1–15.

7. Tarasov V.N., Boyarkina I.V., Serebrennikov V.S. Analiticheskiy metod issledovaniya vertikal'nykh peremeshcheniy vibroval'tsa dorozhnogo katka pri uplotnenii materialov i gruntov [Analytical method for the study of vertical movements of the vibrating roller of a road roller during compaction of materials and soils]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2019; 7: 13–18. (in Russ.)

8. 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)

9. Pietzsch D., Poppy W. Simulation of soil compaction with vibratory rollers. J. Terramechanics. 1993; 29(6): 585–597.

10. Li S., Hu C. Study on Dynamic Model of Vibratory Roller - Soil System. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018; Vol. 113, № 1.

11. Liu L. et al. Nonlinear Dynamics of the Rigid Drum for Vibratory Roller on Elastic Subgrades. *Shock Vib*. 2021; Vol. 2021:1–9.

12. Evseev E.YU., Kupriyanov R.V., Zubkov A.F. Analiz primeneniya vibratsionnykh plit dlya remonta dorozhnykh pokrytiy nezhestkogo tipa [Analysis of the

use of vibration plates for the repair of non-rigid road surfaces]. *Mekhanizatsiya stroitel'stva*. 2011; 6(804): 28–31. (In Russ.)

13. Musiyako D.V., Rasulov R.A. Samokhodnaya vibratsionnaya plita s val'tsem [Self-propelled vibrating plate with roller]. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2016; 4(43):73–80. (In Russ.)

14. Kuz'michev V.A., Kuz'michev V.D. Issledovanie rabochnykh parametrov samokhodnykh vibroplit, primenyaemykh pri uplotnenii gruntov [Investigation of the operating parameters of self-propelled vibrating plates used in soil compaction]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2011; 3(28): 66–71. (In Russ.)

15. Tyuremnov I.S., Novichikhin A.A. Statisticheskiy analiz tekhnicheskikh kharakteristik vibratsionnykh plit [Statistical analysis of the technical characteristics of vibrating plates]. *Mekhanizatsiya stroitel'stva*. 2014;11:32–35. (In Russ.)

16. Tyuremnov I.S., Fedorova D.V. Statistical processing of technical characteristics of vibrating plate compactors. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019;16(2):122–133. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-2-122-133>

17. Tyuremnov I.S., Ignat'ev A.A., Filatov I.S. Statisticheskiy analiz tekhnicheskikh kharakteristik gruntovykh vibratsionnykh katkov [Statistical analysis of technical characteristics of ground vibration rollers]. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2014; 3(34):81–88. (In Russ.)

18. SHishkin E.A. et al. Issledovanie vzaimosvyazi konstruktivnykh i tekhnologicheskikh parametrov vibratsionnykh i ostsillyatsionnykh katkov [Investigation of the relationship between the design and technological parameters of vibration and oscillation rollers]. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2021; 2: 183–188. (In Russ.)

19. 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.

20. Tyuremnov I.S. Obzor sistem nepreryvnogo kontrolya uplotneniya grunta dlya vibratsionnykh katkov. CHast' 3. Osobennosti funktsionirovaniya i «intellektual'noe uplotnenie» [Overview of continuous soil compaction monitoring systems for vibrating rollers. Part 3. Features of functioning and «intelligent sealing»]. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2016; 2(41):115–122. (In Russ.)

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Тюремнов Иван Сергеевич – канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Строительные и дорожные машины».

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Ivan S. Tyuremnov – Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Construction and Road Machines Department.