

Научная статья
УДК 625.76.08
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-12-25>
EDN: NTKBQI



АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ КОНСТРУКЦИЙ САМОХОДНЫХ ВИБРОПЛИТ

М.А. Афанасьев ✉, И.С. Тюремнов

Ярославский государственный технический университет,
г. Ярославль, Россия

✉ ответственный автор
afanasiev.m.a2016@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Самоходные виброплиты – грунтоуплотняющие машины поверхностного действия, оснащенные плоским рабочим органом, который вводится в состояние колебательного движения при помощи вибровозбудителя. Разнообразие конструкций самоходных виброплит является одной из причин существенного разброса значений их основных параметров в соответствующих диапазонах масс. С целью совершенствования методик проектирования самоходных виброплит был выполнен анализ существующих конструкций и проанализировано их влияние на технические характеристики и технологические параметры самоходных виброплит.

Материалы и методы. В ходе исследования были изучены данные о конструкциях и технических характеристиках самоходных виброплит, представленные на сайтах и в сопроводительных материалах производителей, а также их дилеров. В общей сложности было рассмотрено 1137 моделей реверсивных и нереверсивных виброплит российских и зарубежных производителей.

Результаты. Выявлены конструктивные особенности промышленно выпускаемых самоходных виброплит, установлены диапазоны изменения их основных параметров. Проанализированы взаимосвязи компоновки самоходных (в том числе электрических) виброплит с их техническими характеристиками и расчетными схемами.

Заключение. Существенный разброс значений основных параметров реверсивных и нереверсивных виброплит отчасти связан с наличием у виброплит ряда конструктивных особенностей: количеством дебалансных валов, характером колебаний, типом трансмиссии и др. Большинство моделей нереверсивных виброплит при моделировании должны рассматриваться как двухмассные системы, содержащие рабочий орган и раму, соединенные упруго-вязкими связями. Ряд электрических виброплит представляет собой одномассную систему, что влияет на модели их взаимодействия с грунтом. Форма основания виброплиты оказывает влияние на значения контактных напряжений, количество циклов приложения нагрузки к одной точке грунта за один проход, глубину уплотнения и маневренность.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: грунт, виброплита, уплотнение, вибрация, относительная вынуждающая сила, вынуждающая сила, виброплита нереверсивная, виброплита реверсивная, глубина уплотнения, ширина основания, длина основания

Статья поступила в редакцию 18.03.2024; одобрена после рецензирования 26.12.2024; принята к публикации 24.02.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Афанасьев М.А., Тюремнов И.С. Анализ особенностей конструкций самоходных виброплит // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 1. С. 12-25. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-12-25>

© Афанасьев М.А., Тюремнов И.С., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-12-25>
EDN: NTKBQI

ANALYSIS OF DESIGN FEATURES OF VIBRATORY PLATE COMPACTORS

Mikhail A. Afanasev ✉, Ivan S. Tyuremnov
Yaroslavl State Technical University,
Yaroslavl, Russia
✉ corresponding author
afanasiev.m.a2016@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. Vibratory plate compactors are soil compaction machines with a flat operating device, which is put into a state of oscillatory motion by a vibration exciter. The variety of designs of vibratory plate compactors is one of the reasons for significant variations in their main parameters for the corresponding mass ranges. In order to improve the design methods for self-propelled vibratory plate compactors, an analysis of existing designs has been made. The impact of design on the technical characteristics of vibratory plate compactors has been analyzed.

Materials and methods. The study analyses data on the designs and technical characteristics of vibratory plate compactors, presented on the websites and in accompanying materials of manufacturers, as well as their dealers. A total of 1,137 models of reversible and forward vibratory plate compactors manufactured by Russian and foreign companies were reviewed.

Results. The design features of vibratory plate compactors have been identified, the ranges of their main parameters have been established. The relationship between the layout of self-propelled (especially, electric) plate compactors and their technical characteristics and analytical models has been analyzed.

Conclusion. The scattered main parameters of reversible and forward plate compactors are partly due to the design features of the plate compactors, such as number of unbalanced shafts, the nature of vibrations, the type of transmission, etc. Most of vibratory plate compactors must be considered as two-mass oscillation systems with elasto-viscous bonds when modeling. A number of electric plate compactors are single-mass oscillation systems, which affects the patterns of their interaction with the ground. The base plate shape influences the magnitude of contact stresses, the number of cycles of load applications to one point of soil in one pass, the compaction depth and maneuverability.

KEYWORDS: soil, plate compactor, compaction, vibration, relative driving force, driving force, forward plate compactor, reversible plate compactor, compaction depth, base plate width, base plate length

The article was submitted: 18.03.2024 approved after reviewing: 26.12.2024; accepted for publication: 24.02.2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Afanasev M.A., Tyuremnov I.S. Analysis of design features of vibratory plate compactors. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (1): 12-25. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-12-25>

© Afanasev M.A., Tyuremnov I.S., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

Самоходные виброплиты (далее – виброплиты) – грунтоуплотняющие машины (ГУМ) поверхностного действия, оснащенные плоским рабочим органом, который приводится в движение при помощи вибровозбудителя¹. В отличие от других видов грунтоуплотняющих машин вибрационного действия, в виброплитах колебательное движение рабочего органа обеспечивает не только уплотнение грунта, но и перемещение машины.

Виброплиты классифицируются по следующим признакам [1]:

- по массе – сверхлегкие (до 100 кг), легкие (100...200 кг), средние (200...500) и тяжелые (свыше 500 кг);
- по способу передвижения – реверсивные и нереверсивные;
- по типу двигателя – бензиновые, дизельные и электрические;
- по способу управления – ручное и дистанционное.

Основными параметрами виброплит являются масса (M , кг), частота колебаний (f , Гц) и вынуждающая сила вибровозбудителя (P , кН). На эффективность уплотнения грунта также влияет ряд дополнительных параметров, к которым относятся мощность двигателя (N , кВт), длина (D , мм) и ширина (B , мм) основания, а также относительная вынуждающая сила P/Q , определяемая как отношение вынуждающей силы (P , кН) к весу виброплиты (Q , кН).

Для оценки результата уплотнения грунта виброплитами используются технологические параметры: коэффициент уплотнения грунта, глубина уплотняемого слоя и число проходов, необходимых для достижения требуемого коэффициента уплотнения.

Текущими направлениями совершенствования самоходных виброплит являются повышение их эффективности, улучшение безопасности для человека и окружающей среды, расширение функциональных возможностей, увеличение уплотняющей способности, а также повышение надежности основных деталей и узлов. Исходя из этого, современные исследования касаются вопросов повышения производительности и снижения стоимости виброплит [2, 3], защиты оператора от вибрации

[4], обеспечения самоходности и увеличения крутизны преодолеваемого уклона [5, 6, 7], а также возможности использования виброплит вблизи строений и подземных коммуникаций [8, 9]. Общим направлением развития всех основных типов грунтоуплотняющих машин является внедрение систем непрерывного контроля уплотнения. Как правило, такие системы рассматриваются применительно к вибрационным каткам² [10, 11, 12, 13, 14], однако те же принципы могут использоваться в системах непрерывного контроля уплотнения для виброплит [15].

Исследования показывают, что для существующих моделей виброплит наблюдается значительный разброс технических характеристик в соответствующих диапазонах масс [16, 17]. С одной стороны, такой разброс может быть связан с отсутствием у производителей общепринятых методик, позволяющих оценить влияние технических характеристик виброплит на результат уплотнения грунта в заданных условиях. В то же время отклонения некоторых параметров могут быть связаны с конструктивными особенностями отдельных моделей виброплит, что требует дополнительной проверки.

В исследованиях [16, 17] рассматривается влияние типа двигателя реверсивных и нереверсивных виброплит на их технические характеристики. Однако в указанных исследованиях не учитывается наличие у различных моделей виброплит конструктивных особенностей (форма основания, количество дебалансных валов, тип трансмиссии и др.), которые прямо или косвенно могут влиять на технические характеристики и технологические параметры виброплит.

Цель данного исследования – выявление конструктивных особенностей самоходных виброплит и определение их взаимосвязи с техническими характеристиками для совершенствования методики проектирования данного типа грунтоуплотняющих машин.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании использованы данные о технических характеристиках, технологических возможностях и конструктивных особенностях самоходных виброплит, пред-

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

² Kaufmann, K. & Anderegg, Roland. GPS-based Compaction Technology. Proceedings of the 1st International Conference on Machine Control and Guidance. 2008. 287–296.

ставленные на официальных сайтах и в информационных материалах производителей и их дилеров. Сортировка и обработка данных выполнена в программе Microsoft Excel.

При выполнении исследования были рассмотрены в общей сложности 1137 моделей самоходных виброплит, выпускаемые под 67 марками (Дупарас, Enar, Lumag, Сплитстоун, Техком, Вибромаш, Huter, KOMAN, NTC, Красный маяк, Zitrek, Wacker Neuson, Impulse, Lifan, MBW, BOMAG, Husqvarna, Chicago Pneumatic, Mikasa и др.). Из этих моделей 55 произведены в странах СНГ (Россия, Белоруссия), 470 – на территории КНР и 612 – в других странах (Великобритания, США, Германия, Италия, Швейцария, Франция, Чехия, Япония, Южная Корея, Швеция, Испания, Израиль).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Предварительный анализ заявленных технических характеристик самоходных виброплит показал, что рассматриваемые модели имеют различия по форме основания, количеству и расположению дебалансов вибро-

возбудителя, типу трансмиссии, а также типу двигателей. Более подробно влияние типа двигателя на технические характеристики реверсивных и нереверсивных виброплит рассмотрено в исследованиях [16, 17].

В зависимости от формы основания существуют виброплиты с прямоугольным (рисунок 1, а) и круглым основанием. Во втором случае основание виброплиты может иметь форму, близкую к окружности (рисунок 1, б) или быть лишь немного скругленной (рисунок 1, в). Однако, поскольку в обоих случаях используется одинаковая компоновка рамы и двигателя, в каталогах производителей оба варианта конструкции указываются как виброплиты с круглым основанием.

Следует также отметить, что все промышленно выпускаемые модели виброплит имеют плоское основание. В отдельных патентах³ предлагаются альтернативные варианты профиля опорной плиты, которые тем не менее до сих пор не нашли применения в серийно выпускаемых виброплитах.

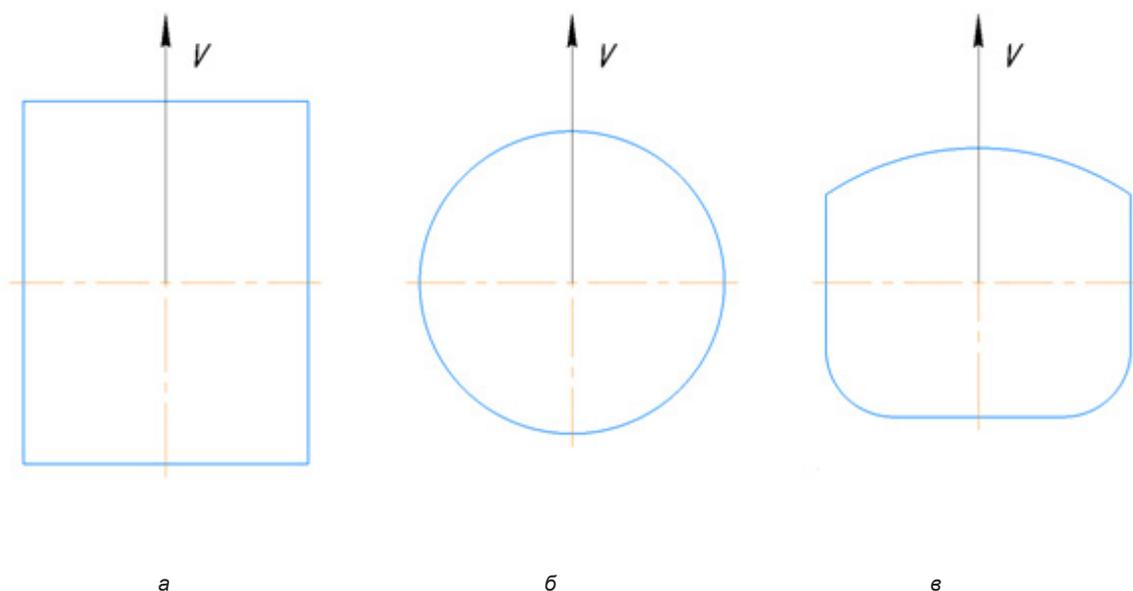


Рисунок 1 – Формы основания самоходных виброплит:
а – прямоугольная; б – круглая; в – круглая модифицированная
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Shapes of base plates of vibratory plate compactors:
a – rectangular; b – round; c – modified round
Source: compiled by the authors.

³Beierlein, B. (1967). Tamping device (U.S. Patent No. 3,342,118)

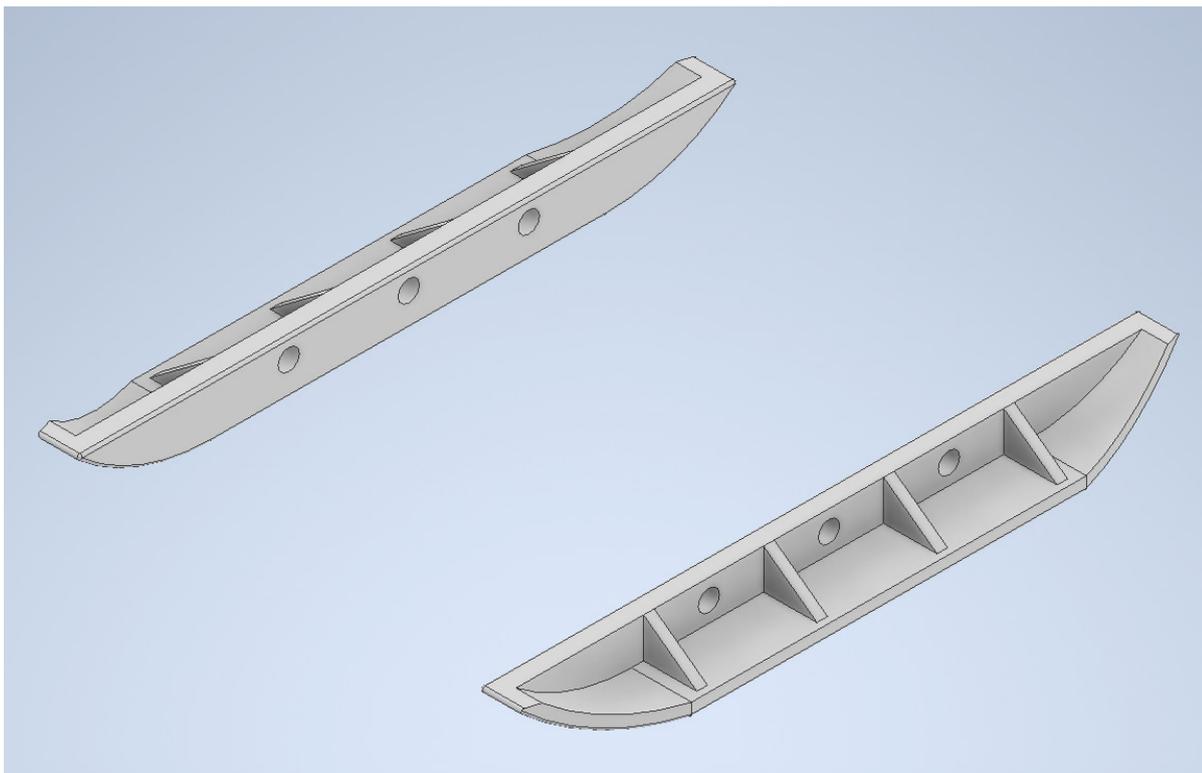


Рисунок 2 – Уширительные пластины для увеличения ширины основания виброплиты
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Extension plates to increase the width of plate compactors base plate
Source: compiled by the authors.

Среди реверсивных и нереверсивных виброплит наибольшее распространение получили модели с прямоугольным основанием (см. рисунок 1, а). В этом случае, при прямолинейном движении, по всей ширине основания виброплиты обеспечивается равное количество циклов приложения нагрузки к одной точке грунта за один проход.

Изменение размеров прямоугольного основания влияет на технологические возможности виброплиты сложным образом. Увеличение ширины основания, с одной стороны, позволяет увеличить ширину полосы уплотнения, а с другой – снижает значения контактных напряжений. Увеличение длины основания также снижает значения контактных напряжений, но при этом повышает количество циклов приложения нагрузки к одной точке грунта за один проход, что, в свою очередь, снижает требуемое количество проходов по одному следу. Интересно отметить, что для большинства существующих виброплит (как реверсивных, так и нереверсивных) габаритная длина основания превышает его ширину. При этом

многие модели реверсивных виброплит имеют возможность увеличения ширины основания за счет применения уширительных пластин (рисунок 2), которые крепятся к основной плите, что позволяет увеличить ширину полосы уплотнения, но также снижает значения контактных напряжений. Для отдельных моделей (Husqvarna LG 504, AMMANN APH 110/95, AMMANN APH 85/95, AMMANN APH 65/85 и др.) имеется возможность увеличения ширины основания до двух раз.

В отдельных случаях могут применяться специальные конструктивные исполнения виброплит. Так, для укладки тротуарной плитки и брусчатки могут использоваться виброплиты с роликовым основанием (Mikasa MVB-85M и др.). При уплотнении асфальтобетонов применяются виброплиты, оснащенные системой подачи воды к основанию (AMMANN APF 1033, ZITREK Z3K61W, TSS-WP90TL и др.). Для укладки плитки применяются виброплиты с возможностью крепления демфирующих ковриков (Сплитстоун VS-244, Masalta MSR90 и др.).



Рисунок 3 – Неревверсивная виброплита Tremix KMR 11 с круглым основанием⁴

Figure 3 – Forward plate compactor Tremix KMR 11 with round base plate⁴

Недостатком виброплит с прямоугольным основанием является относительно низкая маневренность, что затрудняет их использование вблизи столбов и опор. По этой причине в линейках ведущих производителей виброплит представлены модели с круглым основанием (рисунок 3). Такие модели есть в линейках Chicago Pneumatic (модель KMR 11), Dynapac (LX90, D.ROUND), Husqvarna (LX90), Tremix (KMR 11), Weber MT (CFR90), BOMAG (BR95) и Wacker Neuson (BRS90 и ARS90e).

Главной отличительной особенностью данного типа виброплит является то, что длина и ширина основания здесь почти равны. При этом рукоять оператора располагается прямо над опорной поверхностью, что также облегчает маневрирование (в виброплитах с прямоугольным основанием рукоять вынесена за пределы опорной поверхности).

Ранние модели таких виброплит (Tremix KMR 11, Dynapac LX90, Chicago Pneumatic KMR 11, Husqvarna LX90) имеют полностью круглое основание (см. рисунок 1, б). Главным недостатком такой конструкции является то, что при прямолинейном движении количество циклов приложения нагрузки к одной точке

грунта распределяется по ширине основания неравномерно и при приближении к боковым кромкам стремится к нулю. По всей видимости, это привело к тому, что на более современных моделях виброплит (Dynapac D.ROUND, Weber CFR90, BOMAG BR95, Wacker Neuson BRS90 и Wacker Neuson ARS90e) основание имеет форму, представленную на рисунке 1, в.

Виброплиты с круглым основанием оснащаются однофазным возбудителем круговых колебаний и являются неревверсивными. Большинство моделей (Chicago Pneumatic KMR 11, Dynapac LX90, Dynapac D.ROUND, Husqvarna LX90, Tremix KMR 11, Weber MT CFR90, BOMAG BR95 и Wacker Neuson BRS90) оснащаются бензиновым двигателем, однако встречаются и электрические модели (Wacker Neuson ARS90e).

Анализ технических характеристик показывает, что вынуждающая сила и масса виброплит с круглым основанием соответствует усредненным значениям данных параметров для группы неревверсивных виброплит (рисунок 4). Аналогичная ситуация наблюдается для значений частоты колебаний и относительной вынуждающей силы.

⁴ TREMIX. Soil and Asphalt Compaction. Tremix, Satra, Sweden, 2007-12-19.

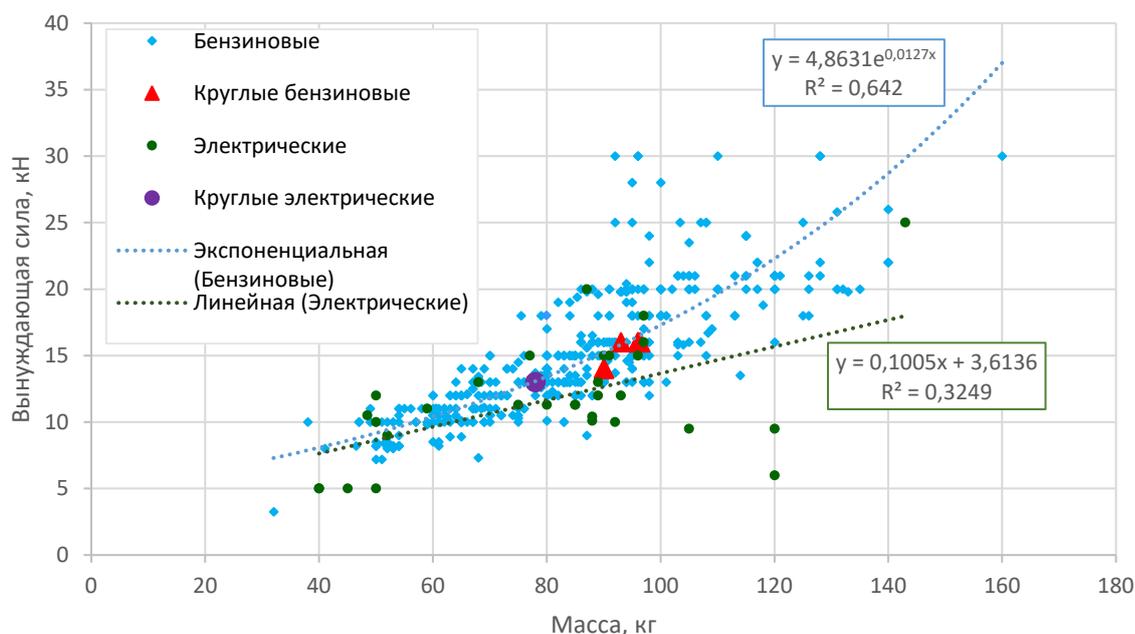


Рисунок 4 – Взаимосвязь массы и вынуждающей силы нереверсивных виброплит с круглым и прямоугольным основанием
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Correlation between mass and driving force of forward plate compactors with rectangular and round base plate.
Source: compiled by the authors.

При этом площадь контактной поверхности виброплит с круглым основанием несколько ниже, чем у виброплит с прямоугольным основанием с сопоставимыми значениями массы и вынуждающей силы. Таким образом, основные различия между виброплитами с круглым и прямоугольным основанием заключаются в технологических параметрах: количестве циклов приложения нагрузки к одной точке грунта за один проход (что обусловлено различной длиной оснований), значениях контактных напряжений и глубины уплотнения (что связано с различиями в размерах и площади оснований⁵), а также маневренности.

В зависимости от типа двигателя выделяют бензиновые, дизельные и электрические виброплиты. Исследования показывают, что наибольший разброс значений технических характеристик (в частности, значений вынуждающей силы, частоты колебаний и относительной вынуждающей силы) наблюдается для группы нереверсивных виброплит с электрическим двигателем [16]. Это связано

с наличием в этой группе как минимум трех вариантов конструкций, которые различаются передаточным отношением трансмиссии и расположением дебалансов.

Таким образом, применение электрического привода, помимо снижения уровня шума, уменьшения вредных для окружающей среды выбросов и более простой конструкции, открывает возможности для реализации большого количества компоновочных схем виброплиты. В частности, становится возможным использование индивидуального привода каждого из дебалансных валов в отдельности, например, за счет применения площадочных вибраторов общего назначения. При такой конструкции отпадает необходимость в трансмиссии, связывающей двигатель и вибровозбудитель (наличие которой оказывает влияние на упруго-вязкие свойства подвески виброплиты, поскольку двигатель внутреннего сгорания может быть установлен только на поддрессоренной раме).

⁵ Хархута Н.Я. Машины для уплотнения грунтов. Л.: Машиностроение, 1973. 176 с.

Таблица

Диапазоны изменения параметров различных типов виброплит
Источник: составлено авторами.

Table

Ranges of parameters for different types of plate compactors

Source: compiled by the authors.

Параметр	Тип виброплиты			
	Бензиновые	Электрические, стандартная компоновка	Электрические, вибратор общего назначения	Электрические, перед. число = 1
Масса плиты М, кг	32...160	40...212		
		48,5...212	40...85	50...120
Вынуждающая сила Р, кН	3,25...30	5...30		
		9...30	5...11,3	6...16
Частота колебаний f, Гц	60...126	47,5...112		
		81...112	50	47,5...60
Мощность двигателя N, кВт	1,4...6,3	0,25...4		
		0,6...4	0,25...0,9	1,5...2,2
Относительная вынуждающая сила Р/Q	10,35...33,24	5,1...24,46		
		11,08...23,43	10,19...15,36	5,1...24,46

Кроме того, потенциально отпадают ограничения по месту установки дебалансных валов на опорной плите, поскольку становится возможной синхронизация вращения дебалансных валов не механически, а за счет изменения управляющего сигнала, подаваемого на каждый электродвигатель в отдельности (в этом случае для коррекции управляющего сигнала требуется наличие сигнала обратной связи по фазовому положению каждого из дебалансных валов в отдельности)⁶. Все это существенно расширяет перспективы дальнейшего использования электрического привода в конструкциях самоходных виброплит и требует отдельного внимания.

Большинство промышленно выпускаемых моделей электрических нереверсивных виброплит имеют стандартную компоновку, при которой возбудитель круговых колебаний расположен в передней части опорной плиты, а передача крутящего момента от двигателя осуществляется с помощью ременной передачи с передаточным числом $u \leq 1$ (как правило, $u = 0,6 \dots 0,67$). Сам двигатель при этом установлен на раме с использованием демпферов. При такой конструкции технические характеристики виброплиты максимально приближены к значениям аналогичных параметров бензиновых виброплит сопоставимой массы

(таблица), а сама виброплита может рассматриваться как двухмассная система.

Нереверсивные электрические виброплиты производства РФ (модели Вибромаш ВУ-11-75, Вибромаш ВУ-04-40, Вибромаш ВУ-05-45, Красный маяк ВУ-05-45, Красный маяк ВУ-11-75, ЗУБР ЗВПЭ-5Г) оснащаются площадочными вибраторами общего назначения. При такой конструкции дебалансы расположены прямо на валу двигателя, а трансмиссия фактически отсутствует. В результате частота колебаний дебалансов соответствует частоте вращения вала двигателя и равна 50 Гц, что примерно в 2 раза ниже, чем у большинства нереверсивных виброплит с бензиновым двигателем сопоставимой массы. Снижение частоты колебаний также приводит к снижению значений вынуждающей силы и относительной вынуждающей силы.

Другой особенностью виброплит, оснащенных вибраторами общего назначения, является возможность регулирования статического момента и, как следствие, значения вынуждающей силы вибровозбудителя при фиксированной частоте колебаний. Регулировка осуществляется путем совмещения составных дебалансов по установочным отверстиям и позволяет изменять значение статического момента примерно в 2 раза (рисунок 5).

⁶ Malaschewski, A., Pinkert, M. (2018). Soil Compactor (DE 10 2017 109 686 A1

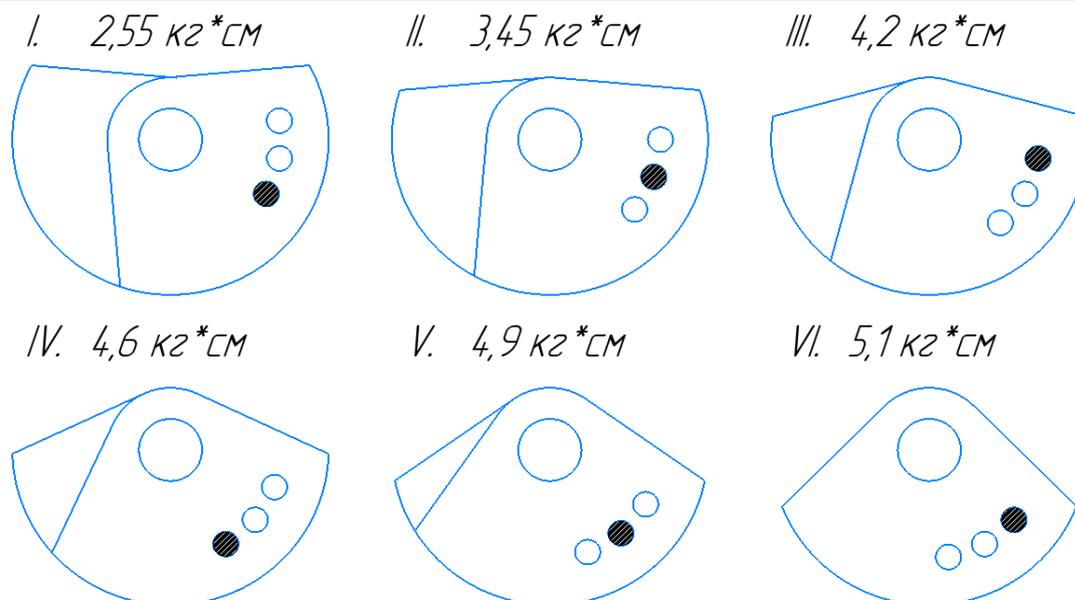


Рисунок 5 – Регулирование статического момента на примере вибровозбудителя ИВ-99Б (виброплита Красный маяк ВУ-05-45)
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Regulation of static moment of IV-99B vibration exciter (installed on plate compactor Krasniy Mayak VU-05-45)
Source: compiled by the authors.

Нереверсивные электрические виброплиты, выпускаемые компаниями МИСОМ (Белоруссия) и Belle (Франция), как и большинство нереверсивных виброплит, оснащаются отдельным вибровозбудителем, вынесенным в переднюю часть опорной плиты. При этом передаточное отношение трансмиссии в ряде моделей от этих производителей (МИСОМ СО-281, МИСОМ СО-325, МИСОМ СО-309, Belle PCLX 12/40E, Belle PCLX 16/45E) равно или близко к единице. В результате частота колебаний вибровозбудителя на указанных моделях находится в диапазоне 47,5–60 Гц.

Интересно отметить, что, несмотря на относительно низкую частоту колебаний, значения вынуждающей силы виброплит Belle PCLX 12/40E и Belle PCLX 16/45E находятся в диапазоне значений электрических виброплит со стандартной компоновкой в соответствующих диапазонах масс. Добиться таких показателей можно только увеличением статического момента дебаланса, однако это приводит и к увеличению амплитуды колебаний.

На рисунках 6, 7, 8, 9 приведены графические представления взаимосвязей технических характеристик электрических виброплит различного типа с их массой.

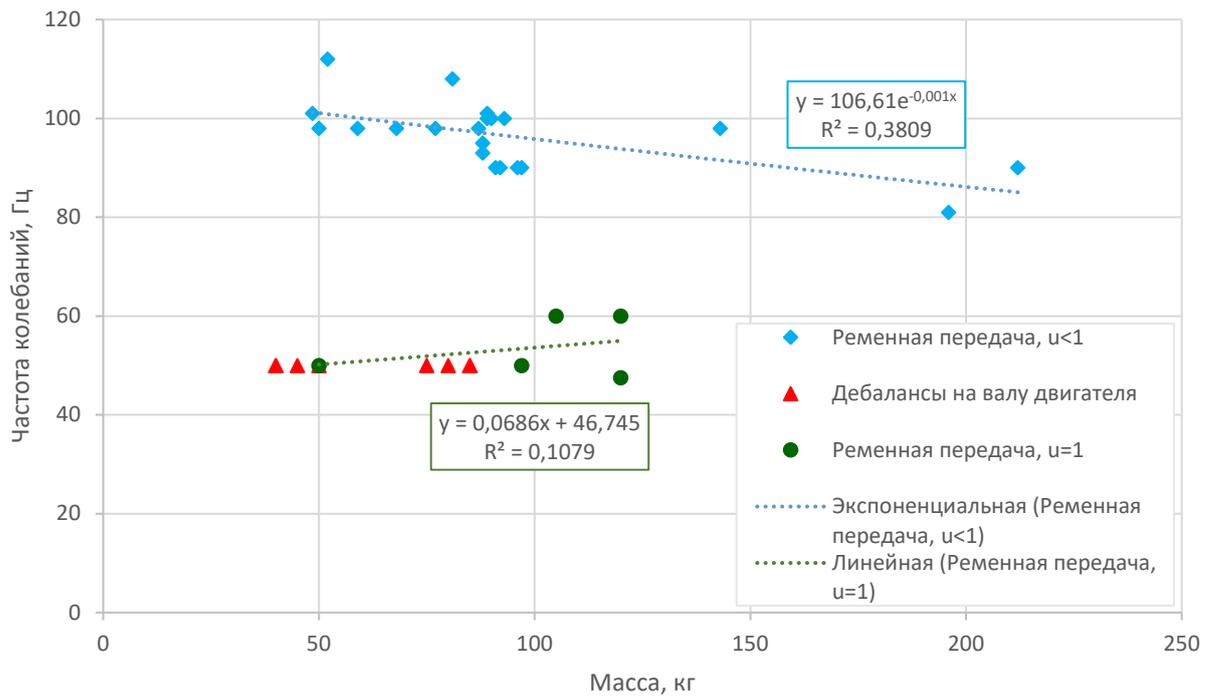


Рисунок 6 – Частота колебаний вибровозбудителя электрических виброплит различной массы
 Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Oscillation frequency of vibration exciter of electric plate compactors with different mass
 Source: compiled by the authors.

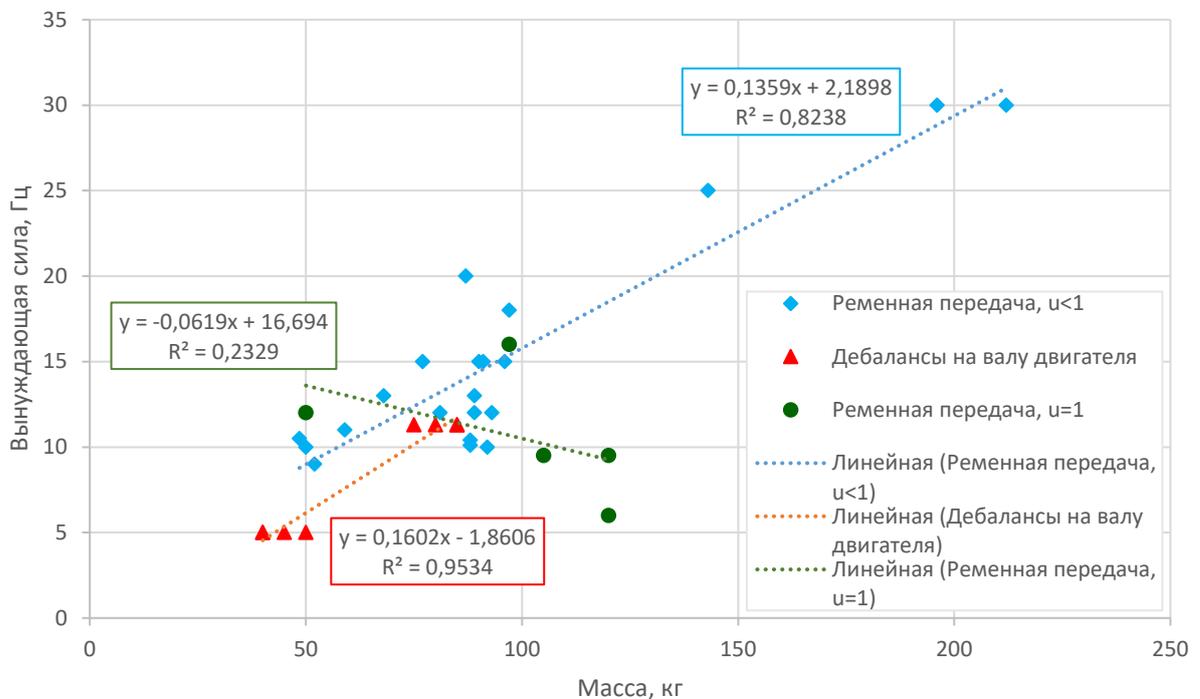


Рисунок 7 – Вынуждающая сила электрических виброплит различной массы
 Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Driving force of electric plate compactors with different mass
 Source: compiled by the authors.

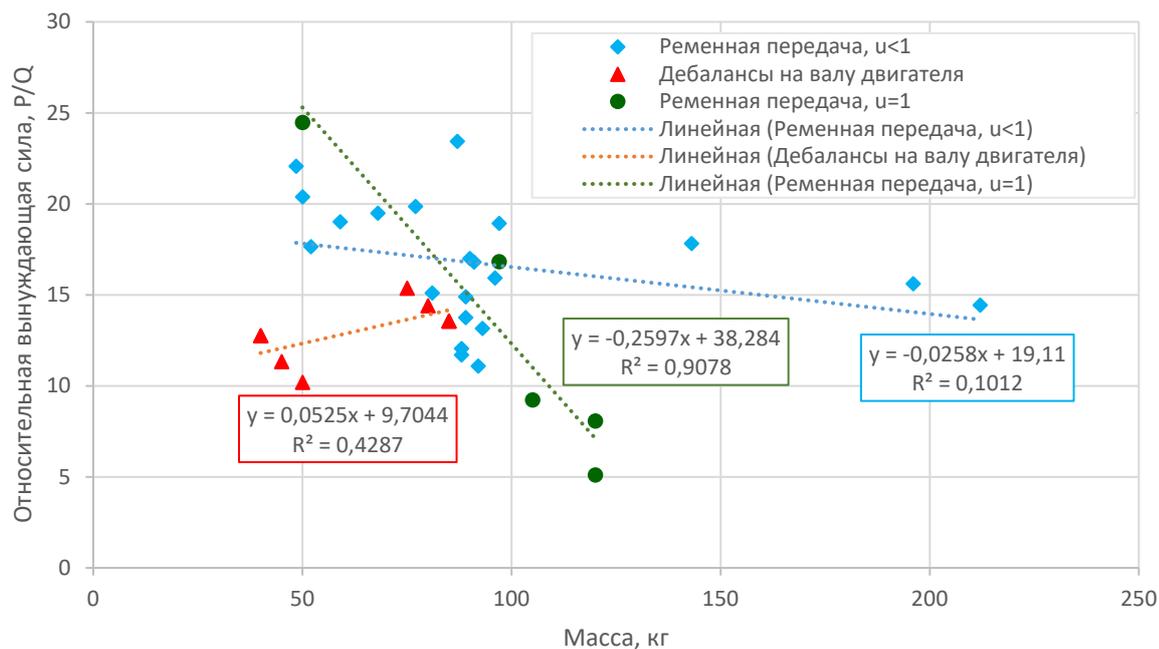


Рисунок 8 – Относительная вынуждающая сила электрических виброплит различной массы
 Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Relative driving force of electric plate compactors with different mass
 Source: compiled by the authors.

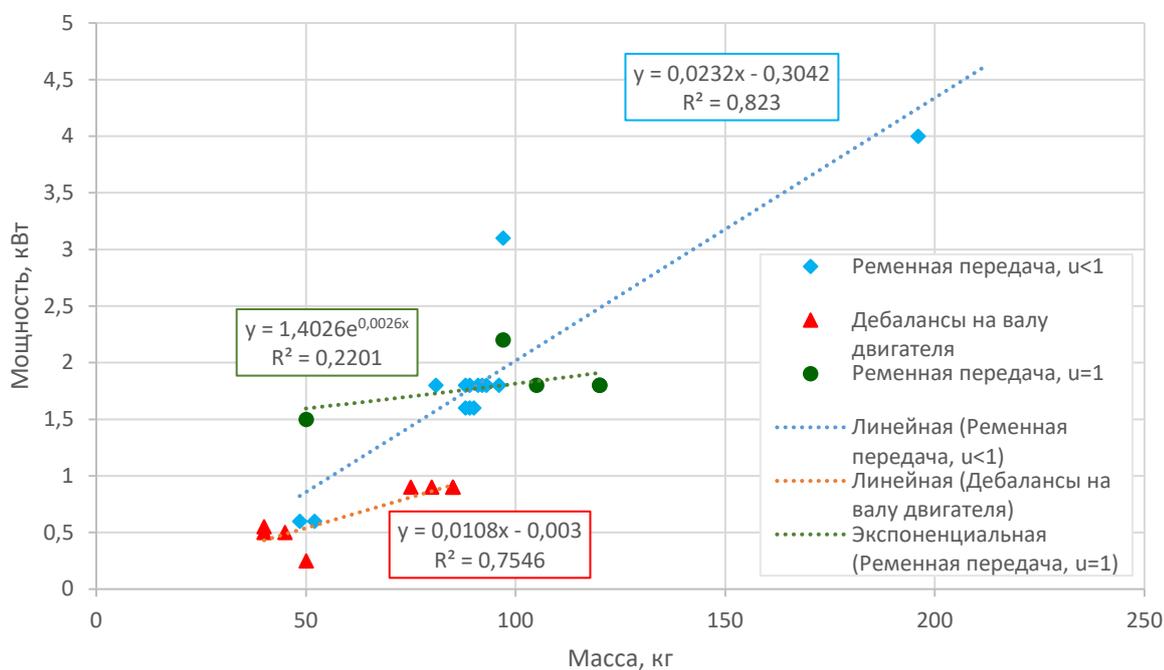


Рисунок 9 – Мощность электрических виброплит различной массы
 Источник: составлено авторами.

Figure 9 – Engine power of electric plate compactors with different mass
 Source: compiled by the authors.

Тип трансмиссии также взаимосвязан с техническими характеристиками виброплит. Все нереверсивные виброплиты (за исключением электрических моделей Вибромаш ВУ-11-75, Вибромаш ВУ-04-40, Вибромаш ВУ-05-45, Красный маяк ВУ-05-45, Красный маяк ВУ-11-75, ЗУБР ЗВПЭ-5Г) и значительная часть реверсивных виброплит оснащаются ременной передачей, что позволяет упростить конструкцию и снизить стоимость виброплит. На реверсивных виброплитах массой свыше 350 кг применяется гидравлический привод. Его использование обусловлено повышением мощности двигателя с увеличением массы виброплиты, что снижает ресурс трансмиссии в случае использования ременной передачи.

ОБСУЖДЕНИЕ

Наибольший разброс параметров наблюдается в группе электрических виброплит. Это связано с максимальным разнообразием используемых в них компоновочных решений. Электрические нереверсивные виброплиты со стандартной компоновкой (возбудитель круговых колебаний расположен в передней части опорной плиты, передаточное число ременной передачи $u < 1$) по большинству параметров (кроме мощности) соответствуют диапазону значений моделей с бензиновым двигателем. При этом у отдельных моделей низкие значения частоты колебаний компенсируются увеличением статического момента дебаланса, что позволяет повысить значение вынуждающей силы, но также приводит к увеличению амплитуды колебаний.

В общем случае виброплита может рассматриваться как рабочий орган, движение которого ограничивается двумя подвижными ограничителями. В качестве верхнего ограничителя выступает инерционное сопротивление рамы виброплиты с двигателем. В качестве нижнего ограничителя выступает деформируемый грунт. Рама воздействует на рабочий орган через амортизаторы (связи с линейными характеристиками: упругими и вязкими). Грунт представляет собой ограничитель с нелинейными связями, поскольку периодически может разрываться контакт грунта с рабочим органом виброплиты. Таким образом, виброплита при моделировании должна рассматриваться как двухмассная система с двумя ограничителями (или трёхмассная система, если учитывается присоединенная масса грунта). На некоторых моделях электрических виброплит дебалансы устанавливаются прямо на электродвигатель, жестко связанный с основанием, что приводит

к необходимости изменения расчетной схемы виброплиты, считая ее одномассной системой (или двухмассной, если учитывается присоединенная масса грунта).

Форма основания практически не оказывает влияния на технические характеристики виброплит, однако влияет на их технологические параметры (в частности, ширину полосы уплотнения, контактные напряжения и количество циклов приложения нагрузки к одной точке грунта за один проход). Виброплиты с круглым основанием предназначены для решения узкого перечня задач и применяются сравнительно редко. По этой причине производители задают технические характеристики круглых виброплит, соответствующие усредненным значениям для группы нереверсивных виброплит.

Тип трансмиссии выбирается производителями, исходя из массы виброплиты и мощности двигателя. Ременная передача позволяет снизить стоимость конструкции и применяется на сверхлегких, легких и средних моделях виброплит. Гидравлическая трансмиссия обладает более высоким ресурсом при повышенных значениях мощности двигателя и применяется преимущественно на тяжелых моделях. Возможна также конструкция без трансмиссии (дебалансы установлены непосредственно на валу приводного двигателя). Однако использование такой конструкции ограничено электрическими моделями со сравнительно низкими значениями вынуждающей силы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существенный разброс значений параметров, установленный в исследованиях [16, 17], частично связан с наличием у виброплит ряда конструктивных особенностей, влияющих на диапазоны значений параметров. В частности, это касается группы виброплит с электрическими двигателями, на которых могут применяться вибраторы общего назначения, совмещенные с двигателем, а также различные передаточные отношения трансмиссии. Различия в конструкции электрических виброплит приводят к более чем двукратному разбросу значений частоты колебаний, вынуждающей силы и относительной вынуждающей силы вибровозбудителя при сопоставимой массе виброплиты. Электрические виброплиты, оснащенные площадочным вибратором общего назначения, не отвечают установившимся в последние десятилетия тенденциям по увеличению значений частоты колебаний, вынуждающей силы и относительной вынуждающей силы [16, 17].

При проектировании легких и сверхлегких виброплит целесообразно использовать механическую трансмиссию ввиду ее дешевизны. Гидравлическая трансмиссия может быть использована при проектировании тяжелых нереверсивных виброплит, что позволяет повысить надежность конструкции. Для средних виброплит одинаково пригодна как механическая, так и гидравлическая трансмиссия.

Форма основания виброплиты не связана с ее техническими характеристиками, однако оказывает влияние на технологические параметры: глубину уплотнения, значения контактных напряжений, количество циклов приложения нагрузки к одной точке грунта за один проход, ширину полосы уплотнения и маневренность.

Собранные в ходе исследования данные целесообразно использовать при разработке и модернизации виброплит с различными конструктивными исполнениями.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тюремнов И.С., Новичихин А.А. Уплотнение грунтов вибрационными плитами: монография. Ярославль: Издат. дом ЯГТУ, 2018. 143 с.
2. Sawant, Rohan. (2021). Advance Equipment for Compaction on Site. 10.35291/2454-9150.2021.0099.
3. Massarsch, K. Rainer & Wersäll, Carl. (2019). Vibratory plate resonance compaction. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering*. 173. 1–30. 10.1680/jgeen.19.00169.
4. Кузьмичев В.Д. Математическая модель виброплиты // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2012. № 3(35). С. 65–68.
5. Рябов Г.К., Леонтьева В.С., Федосеев Ю.В. О механизме передвижения бесколесной виброплиты // *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*. 2012. № 3(96). С. 143.
6. Башкарев А.Я., Мусияко Д.В., Пешков В.С. Вибрационное перемещение поверхностного уплотнителя // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*. 2013. № 1(166). С. 175–178.
7. Кузьмичев В.Д. Разработка динамической модели самоходной нереверсивной виброплиты // *Механика XXI века*. 2012. № 11. С. 39–45.
8. Czech, Krzysztof & Gosk, Wojciech. Impact of the Operation of a Tri-band Hydraulic Compactor on the Technical Condition of a Residential Building. *Applied Sciences*. 2019. 9. 336. 10.3390/app9020336.
9. Wang, Chaoyi & Qiu, Tong & Xiao, Ming & Wang, Jintai. Utility Trench Backfill Compaction Using Vibratory Plate Compactor versus Excavator-Mounted Hydraulic Plate Compactor. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 2017. 8. 10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000284.

10. Chen, Chen & Hu, Yongbiao & Jia, Feng & Wang, Xuebin. Intelligent compaction quality evaluation based on multi-domain analysis and artificial neural network. *Construction and Building Materials*. 2022. 341. 127583. 10.1016/j.conbuildmat.2022.127583.

11. Xu, Guanghui & Chang, George & Wang, Dongsheng & Correia, Antonio & Nazarian, Soheil. The pioneer of intelligent construction – An overview of the development of intelligent compaction. *Journal of Road Engineering*. 2022. 2. 10.1016/j.jreng.2022.12.001.

12. Fathi, Aria & Tirado, Cesar & Rocha, Sergio & Mazari, Mehran & Nazarian, Soheil. (2020). Assessing Depth of Influence of Intelligent Compaction Rollers by Integrating Laboratory Testing and Field Measurements. *Transportation Geotechnics*. 28. 100509. 10.1016/j.trgeo.2020.100509.

13. Yao, Yangping & Song, Er Bo. Intelligent compaction methods and quality control. *Smart Construction and Sustainable Cities*. 2023. 1. 10.1007/s44268-023-00004-4.

14. Chen, Chengyong & Chang, Fagang & Li, Li & Dou, Wenqiang & Xu, Changjing. Optimization of intelligent compaction based on finite element simulation and nonlinear multiple regression. *Electronic Research Archive*. 2022. 31. 2775–2792. 10.3934/era.2023140.

15. Anderegg, Roland & Kaufmann, Kuno. Compaction Monitoring Using Intelligent Soil Compactors. *GeoCongress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age*. 2006. 10.1061/40803(187)41.

16. Афанасьев М.А., Тюремнов И.С. Статистический анализ технических характеристик самоходных нереверсивных виброплит с различными типами двигателей // *Вестник СибАДИ*. 2024; 21(4): 488–501. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-488-501>. EDN: BRYOWT.

17. Афанасьев М.А., Тюремнов И.С. Статистический анализ технических характеристик самоходных реверсивных виброплит с различными типами двигателей // *Вестник СибАДИ*. 2024; 21(6): 814–825. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-814-825>. EDN: RBLXHW.

REFERENCES

1. Tyuremnov I.S., Novichikhin A.A. *Soil compaction by vibrating plates: monograph* [Electronic resource]. Yaroslavl. Izdat. dom YaSTU, 2018: 143. (in Russ.)
2. Sawant, Rohan. Advance Equipment for Compaction on Site. 2021. 10.35291/2454-9150.2021.0099.
3. Massarsch, K. Rainer & Wersäll, Carl. Vibratory plate resonance compaction. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering*. 2019; 173. 1–30. 10.1680/jgeen.19.00169.
4. Kuz'michev V.D. Mathematical model of plate compactors. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2012; 3(35): 65–68. (in Russ.)
5. Ryabov G.K., Leont'eva V.S., Fedoseev YU.V. About the movement mechanism of wheelless vibro-

plate. Transactions of Nizhniy Novgorod state technical university N.A.R.Y. Alexeev. 2012; 3(96): 143. (in Russ.)

6. Bashkarev A.Ya., Musiako D.V., Peshkov V.S. Oscillatory motion of the plate compactor. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU*. 2013; 1(166): 175–178. (in Russ.)

7. Kuz'michev V.D. Development of dynamic model of self-propelled non-reversible vibratory plate. *Mechanics to the 21st century*. 2012; 11: 39–45. (in Russ.)

8. Czech, Krzysztof & Gosk, Wojciech. Impact of the Operation of a Tri-band Hydraulic Compactor on the Technical Condition of a Residential Building. *Applied Sciences*. 2019; 9: 336. 10.3390/app9020336.

9. Wang, Chaoyi & Qiu, Tong & Xiao, Ming & Wang, Jintai. Utility Trench Backfill Compaction Using Vibratory Plate Compactor versus Excavator-Mounted Hydraulic Plate Compactor. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 2017; 8: 10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000284.

10. Chen, Chen & Hu, Yongbiao & Jia, Feng & Wang, Xuebin. Intelligent compaction quality evaluation based on multi-domain analysis and artificial neural network. *Construction and Building Materials*. 2022; 341: 127583. 10.1016/j.conbuildmat.2022.127583.

11. Xu, Guanghui & Chang, George & Wang, Dongsheng & Correia, Antonio & Nazarian, Soheil. The pioneer of intelligent construction – An overview of the development of intelligent compaction. *Journal of Road Engineering*. 2022; 2: 10.1016/j.jreng.2022.12.001.

12. Fathi, Aria & Tirado, Cesar & Rocha, Sergio & Mazari, Mehran & Nazarian, Soheil. Assessing Depth of Influence of Intelligent Compaction Rollers by Integrating Laboratory Testing and Field Measurements. *Transportation Geotechnics*. 2020; 28: 100509. 10.1016/j.trgeo.2020.100509.

13. Yao, Yangping & Song, Er Bo. Intelligent compaction methods and quality control. *Smart Construction and Sustainable Cities*. 2023; 1: 10.1007/s44268-023-00004-4.

14. Chen, Chengyong & Chang, Fagang & Li, Li & Dou, Wenqiang & Xu, Changjing. Optimization of intelligent compaction based on finite element simulation and nonlinear multiple regression. *Electronic Research Archive*. 2023; 31: 2775–2792. 10.3934/era.2023140.

15. Anderegg, Roland & Kaufmann, Kuno. Compaction Monitoring Using Intelligent Soil Compactors. GeoCongress 2006: *Geotechnical Engineering in the Information Technology Age*. 2006. 10.1061/40803(187)41.

16. Afanasev M.A., Tyuremnov I.S. Statistical analysis of technical specifications of forward plate compactors with different types of engines. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21(4): 488–501. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-488-501>. EDN: BRYOWT.

17. Afanasev M.A., Tyuremnov I.S. Statistical analysis of technical specifications of self-propelled reversible plate compactors with different types of engines. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21(6): 814–825. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-814-825>. EDN: RBLXHW.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Афанасьев М.А. Сбор информации об особенностях конструкций самоходных виброплит, обработка данных, подготовка текста статьи.

Тюремнов И.С. Общая организация работы, подготовка текста статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Afanasev M.A. Collecting data on the design features of self-propelled plate compactors, processing data, writing the manuscript.

Tyuremnov I.S. General design of the research, writing the manuscript.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Афанасьев Михаил Александрович – аспирант кафедры «Строительные и дорожные машины» Ярославского государственного технического университета (150023, г. Ярославль, Московский пр., 88).

ORCID: 0009-0005-5095-2557,

SPIN-код: 8256-8500,

e-mail: afanasiev.m.a2016@yandex.ru

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

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

SPIN-код: 9976-0728,

e-mail: tyuremnovis@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Afanasev Mikhail A. – Postgraduate student of the Construction and Road Machine Department, Yaroslavl State Technical University (88, Moskovskiy Proezd, Yaroslavl, 150023).

ORCID: 0009-0005-5095-2557,

SPIN-code: 8256-8500,

e-mail: afanasiev.m.a2016@yandex.ru.

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

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

SPIN-code: 9976-0728,

e-mail: tyuremnovis@yandex.ru