

Научная статья
УДК 625.76.08
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-374-387>
EDN: AXFCLB



АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК САМОХОДНЫХ РЕВЕРСИВНЫХ И НЕРЕВЕРСИВНЫХ 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 с плоским рабочим органом, обеспечивающие послойное уплотнение грунта слоями небольшой толщины. В зависимости от способа передвижения выделяют нереверсивные и реверсивные виброплиты. Разработка виброплит требует обоснования ряда технических характеристик, к которым относятся вынуждающая сила, частота колебаний вибровозбудителя, длина и ширина основания, мощность двигателя, относительная вынуждающая сила и др. Для обобщения накопленного опыта производства, а также выявления особенностей в технических характеристиках реверсивных и нереверсивных виброплит, был проведен статистический анализ.

Материалы и методы. В работе исследуются 644 модели нереверсивных и 484 модели реверсивных виброплит. Данные о технических характеристиках рассматриваемых моделей брались с официальных сайтов производителей, а также с сайтов их дилеров. Уравнения регрессии и коэффициенты детерминации получены в программе Microsoft Excel.

Результаты. Определены диапазоны изменения технических характеристик для нереверсивных и реверсивных виброплит. Получены уравнения регрессии и коэффициенты детерминации для взаимосвязей длины и ширины основания, мощности двигателя, вынуждающей силы, частоты колебаний вибровозбудителя и относительной вынуждающей силы от массы нереверсивных и реверсивных виброплит. Большинство полученных зависимостей имеют средние и низкие значения коэффициента детерминации.

Заключение. Диапазоны изменения значений большинства параметров нереверсивных и реверсивных виброплит совпадают в соответствующих диапазонах масс. Исключение составляют только относительная вынуждающая сила и частота колебаний вибровозбудителя, где для нереверсивных виброплит наблюдается существенный разброс значений. Диапазоны значений масс также различаются, причем диапазон значений масс реверсивных виброплит почти полностью перекрывает соответствующий диапазон нереверсивных виброплит. Средние и низкие значения коэффициентов детерминации и значительный разброс отдельных параметров позволяют предположить, что у производителей отсутствует общепринятая методика их обоснования. При выполнении дальнейших исследований целесообразно разделять реверсивные и нереверсивные виброплиты, поскольку их технические характеристики, механизм передвижения и распределение напряжений по контактной поверхности с грунтом различаются. Для повышения эффективности виброплит целесообразно исследовать влияние соотношения массы рамы и основания виброплиты, а также характеристик амортизаторов с целью обеспечения требуемой для эффективного уплотнения грунта продолжительности действия контактных напряжений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: грунт, уплотнение, вибрация, виброплита, виброплита нереверсивная, виброплита реверсивная, относительная вынуждающая сила, вынуждающая сила, мощность двигателя, ширина основания, длина основания, анализ статистический, частота колебаний, масса виброплиты

БЛАГОДАРНОСТИ: авторы выражают благодарность редакции журнала «Вестник СибАДИ» и рецензентам статьи.

Статья поступила в редакцию 18.03.2024; одобрена после рецензирования 01.06.2026; принята к публикации 15.06.2026.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

© Афанасьев М.А., Тюремнов И.С., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

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

Для цитирования: Афанасьев М.А., Тюрёмнов И.С. Анализ технических характеристик самоходных реверсивных и неревверсивных виброплит // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 3. С. 374-387. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-374-387>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-374-387>

EDN: AXFCLB

ANALYSIS OF TECHNICAL SPECIFICATIONS OF REVERSIBLE AND FORWARD PLATE COMPACTORS

Mikhail A. Afanasev ✉, Ivan S. Tyuremnov

Yaroslavl State Technical University,

Yaroslavl, Russia

✉ corresponding author

afanasiev.m.a2016@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. Self-propelled plate compactors are soil compaction machines with a flat working body that provide layer-by-layer soil compaction with small-thickness layers. Depending on the method of travel, reversible and forward plate compactors may be distinguished. Designing plate compactors requires substantiation of a number of technical specifications, such as driving force, frequency of vibration exciter, length and width of the base plate, engine power, relative driving force, etc. To summarize the manufacturing experience and reveal specifics in main parameters of reversible and forward plate compactors, a statistical analysis was carried out.

Materials and methods. 644 models of forward and 484 models of reversible plate compactors were examined. Technical specifications data for the models under study was obtained from official websites of plate compactor manufacturers and their dealers. Regression equations and correlation coefficients were calculated in Microsoft Excel.

Results. The variation ranges of technical specifications for forward and reversible plate compactors were determined. Regression equations and correlation coefficients were derived for correlations between the base plate length and width, engine power driving force, oscillation frequency and relative driving force and the mass of forward and reversible plate compactors. Most of the correlations exhibit medium or low correlation coefficients.

Conclusion. The variation ranges for most parameters of forward and reversible plate compactors overlap within their respective mass ranges. The only exceptions are the relative driving force and oscillation frequency of vibration exciters, where forward plate compactors exhibit a significant scatter of values. The mass variation ranges also differ, with mass range of reversible plate compactors almost completely overlapping the corresponding range of forward plate compactors. Medium and low correlation coefficients and significant scatter of certain parameters suggest that manufacturers do not have a generally accepted methodology for their justification. When conducting further research, it is advisable to differentiate between reversible and forward plate compactors, since their technical specifications, travel mechanics and stress distribution along the contact surface differ. Furthermore, to enhance the efficiency of plate compactors, it is reasonable to study the influence of the mass ratio between the frame and the base plate, as well as shock absorber characteristics, in order to ensure the contact stress time required for effective soil compaction.

KEYWORDS: soil, compaction, vibration, plate compactor, forward plate compactor, reversible plate compactor, relative driving force, driving force, engine power, base plate width, base plate length, statistical analysis, oscillation frequency, mass of plate compactor

ACKNOWLEDGEMENTS. The authors express their gratitude to the editorial staff of The Russian Automobile and Highway Industry Journal and the reviewers of the manuscript.

The article was submitted: March 18, 2024; approved after reviewing: June 01, 2026; accepted for publication: June 15, 2026.

All authors have read and approved the final manuscript.

© Afanasev Mikhail A., Tyuremnov Ivan S., 2026



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

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 technical specifications of reversible and forward plate compactors. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (3): 374-387. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-374-387>

ВВЕДЕНИЕ

Уплотнение грунта – это технологический процесс, нацеленный на достижение заданной плотности, увеличение структурной прочности и уменьшение величины последующей осадки оснований и земляных сооружений. Для его выполнения могут быть задействованы различные виды грунтоуплотняющих машин (ГУМ): грунтовые катки статического и динамического действия, трамбуемые машины, вибротрамбовки, траншейные виброкатки, самоходные виброплиты, навесные экскаваторные виброплиты и др.

Самоходные виброплиты (далее – виброплиты) относятся к средствам малой механизации и являются одним из наиболее распространенных видов ГУМ. Они используются в тех случаях, когда применение других типов грунтоуплотняющих машин затруднено или экономически нецелесообразно: при работе на небольших площадках, при необходимости частого перемещения между участками строительства, при уплотнении грунта в труднодоступных местах (траншеях, котлованах, пазах фундамента и т.д.).

Виброплиты различаются по способу управления (ручное и дистанционное), массе (сверхлегкие – до 100 кг, легкие – от 100 до 200 кг, средние – от 200 до 500 кг и тяжелые – более 500 кг), типу двигателя (бензиновый, дизельный и электрический) и способу передвижения (нереверсивные и реверсивные) [1]. Нереверсивные виброплиты способны передвигаться только в прямом направлении. Реверсивные виброплиты способны самостоятельно перемещаться как в прямом, так и в обратном направлении.

Нереверсивные виброплиты характеризуются относительно низкой массой и достаточно простой конструкцией. Как правило, здесь устанавливается одновальный вибровозбудитель круговых колебаний, вынесенный в переднюю часть основания. Самоходность такой виброплиты обеспечивается различием сопротивления передвижению вперед и назад,

которая достигается, с одной стороны, разностью амплитуд колебаний передней и задней кромки основания, а с другой – совпадением фаз отрыва передней кромки от грунта с фазами активного передвижения виброплиты вперед [2].

Реверсивные виброплиты оснащаются одним или несколькими двухвальными вибровозбудителями направленных колебаний (реже – трехвальным вибровозбудителем направленных колебаний). Это приводит к усложнению конструкции и увеличению массы машины. Самоходность реверсивных виброплит обеспечивается фазовым смещением дебалансных валов относительно друг друга на угол в $60^\circ \dots 90^\circ$ или в $-60^\circ \dots -90^\circ$ (для прямого и реверсивного движения соответственно), за счет чего равнодействующая центробежных сил в любой момент времени оказывается наклонена к горизонту на некоторый угол, не равный 0° или 90° , что обеспечивает передвижение машины в горизонтальной плоскости. Механизм реверса облегчает работу в стесненных условиях, в частности, в узких траншеях, где затруднен разворот виброплиты [1].

Существующие исследования по теме виброплит сосредоточены на повышении вибрационной безопасности оборудования [3], увеличении производительности и снижении его стоимости [4, 5]. Помимо этого, исследователями изучается динамика и условия обеспечения самоходности нереверсивных виброплит [6, 7, 8], а также распространение вибрации от работы реверсивных моделей виброплит [9]. Одним из перспективных направлений развития ГУМ, и виброплит в частности, является внедрение так называемых систем «интеллектуального» уплотнения, а также совершенствование методов контроля качества уплотнения¹ [10-20].

В то же время недостаточно изученным остаётся вопрос обоснования технических характеристик нереверсивных и реверсивных виброплит. Существует ряд исследований, в которых содержится статистический анализ

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

виброплит² [20-22]. Однако в них не учитывается большинство моделей виброплит, выпускаемых в настоящее время, а также приводится весьма ограниченная выборка. На основании результатов [23-24] в данной работе рассматриваются технические характеристики самоходных нереверсивных и реверсивных виброплит вне зависимости от типа установленного двигателя (бензинового, дизельного или электрического).

Целью данного исследования являлся сравнительный анализ двух основных типов самоходных виброплит (реверсивных и нереверсивных), а также систематизация данных об их технических характеристиках для совершенствования методик их проектирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для выполнения статистического анализа использовались данные о технических характеристиках нереверсивных виброплит основных отечественных (Вибромаш, Красный маяк, Сплитстоун, Техком и др.) и зарубежных (ALTECO, AMMANN, Batmatic, Belle, BOMAG, Chicago Pneumatic, Diam, Dynapac, Enar, Euro Shatal, Excalibur, FoxWeld, Helmut, Husqvarna, Huter, Impulse, KOMAN, Lifan, Lumag, MBW, Mikasa, NTC, Vibromax, Wacker Neuson, Weber, Zitrek и др.) производителей, представленные на официальных сайтах компаний, а также на сайтах их дилеров. Для структурирования и анализа данных использовалась программа Microsoft Excel.

В статистическом анализе рассматривались 644 модели нереверсивных и 484 модели реверсивных виброплит. Из этих моделей 55 произведены в СНГ (Россия, Беларусь), 468 – в КНР и 605 – в других странах (Великобритания, Германия, Израиль, Испания, Италия, США, Франция, Чехия, Швейцария, Швеция, Южная Корея, Япония).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Основными техническими характеристиками вибрационных плит, определяющими их силовое воздействие на уплотняемый грунт,

являются: масса M (кг), вынуждающая сила P (кН) и частота колебаний f (Гц).

Кроме абсолютного значения вынуждающей силы P , при описании характера работы виброплит полезно использовать относительную вынуждающую силу, которая определяется как отношение вынуждающей силы P к весу виброплиты Q , т.е. P/Q .

Еще одной важной характеристикой грунтоуплотняющих машин является мощность двигателя, поскольку этот показатель влияет на текущие затраты на эксплуатацию оборудования, а также на преодолеваемый уклон.

Ширина опорной поверхности, скорость движения, глубина уплотнения, вид грунта и количество проходов, необходимых для достижения требуемой плотности уплотняемого материала также влияют на производительность виброплиты. Длина опорной поверхности влияет на производительность с нескольких сторон: увеличение длины повышает количество циклов приложения нагрузки к одной точке грунта за один проход, но при этом снижает величину контактных напряжений. Увеличение ширины опорной поверхности также приводит к уменьшению контактных напряжений, но позволяет увеличить ширину полосы уплотнения. Помимо величины контактных напряжений площадь опорной поверхности влияет и на глубину уплотнения².

Нужно отметить, что ширина опорной поверхности виброплиты соответствует ширине основания B , тогда как длина опорной поверхности L отличается от длины основания D (рисунок 1). Это связано с тем, что носок и задник основания изогнуты в профиле (см. рисунок 1).

Для рассмотренных моделей виброплит отношение длины основания к длине опорной поверхности находится в диапазоне $D/L=0,39...0,71$. Причем для реверсивных виброплит это соотношение составляет $D/L=0,39...0,45$, а для нереверсивных – $D/L=0,5...0,71$. Такая разница связана с тем, что для реверсивного движения требуется больший подъем задника, в результате чего увеличивается габаритная длина основания.

² Хархута Н.Я., Андрейченко Ю.Я. Выбор основных параметров виброплит. Строительные и дорожные машины. 1968. №4.

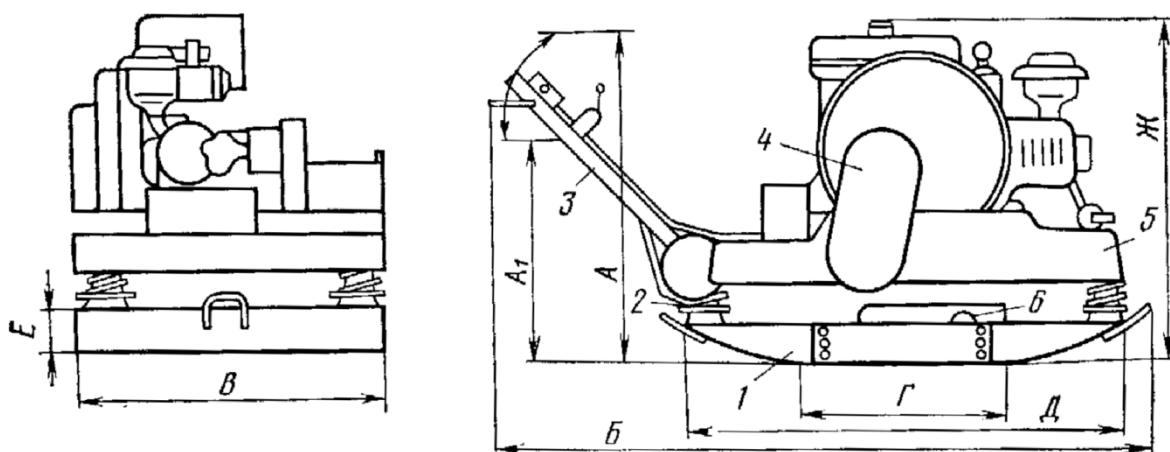


Рисунок 1 – Конструктивная схема и основные размеры виброплиты³:
 1 – основание виброплиты; 2 – амортизаторы; 3 – рукоять; 4 – двигатель; 5 – верхняя платформа;
 6 – вибровозбудитель; А – высота рукояти; Б – габаритная длина; В – ширина основания;
 Г – длина опорной поверхности; Д – длина основания; Е – высота основания; Ж – габаритная высота
 Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Structural scheme and main dimensions of vibratory plate compactor³:
 1 – base plate; 2 – shock absorbers; 3 – handle; 4 – engine; 5 – upper platform; 6 – vibration exciter; А – handle height;
 Б – overall length; В – base plate width; Г – length of the contact surface; Д – base plate length;
 Е – base plate height; Ж – overall height
 Source: compiled by the authors.

На рисунках 2, 3, 4, 5, 6, 7 представлены графики, демонстрирующие взаимосвязь массы виброплиты (M , кг) с вынуждающей силой (P , кН) (см. рисунок 2), частотой колебаний (f , Гц) (см. рисунок 3), мощностью двигателя (N , кВт) (см. рисунок 4), шириной опорной

поверхности (B , мм) (см. рисунок 5), длиной опорной поверхности (D , мм) (см. рисунок 6) и относительной вынуждающей силой P/Q (см. рисунок 7). Диапазоны изменения значений указанных параметров приведены в таблице 1.

Таблица 1
 Диапазоны изменения значений основных параметров нереверсивных и реверсивных виброплит
 Источник: составлено авторами.

Table 1
 Value ranges for basic parameters of forward and reversible plate compactors
 Source: compiled by the authors.

Параметр	Тип виброплиты	
	Нереверсивные	Реверсивные
Масса плиты M , кг	32...1170	
	32...160	54...1170
Вынуждающая сила P , кН	3,25...130	
	3,25...30	8,2...130
Частота колебаний f , Гц	30,5...126	
	47,5...126	30,5...117
Мощность двигателя N , кВт	0,25...21	
	0,25...6,3	1,8...21

³ Хархута Н.Я., Васильев Ю.М. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1975. 288 с.

Параметр	Тип виброплиты	
	Нереверсивные	Реверсивные
Ширина основания В, мм	290...1202	
	290...610	310...1202
Длина основания Д, мм	300...800	
	300...800	430...750
Относительная вынуждающая сила P/Q	5,1...42,18	
	5,1...33,24	7,66...42,18

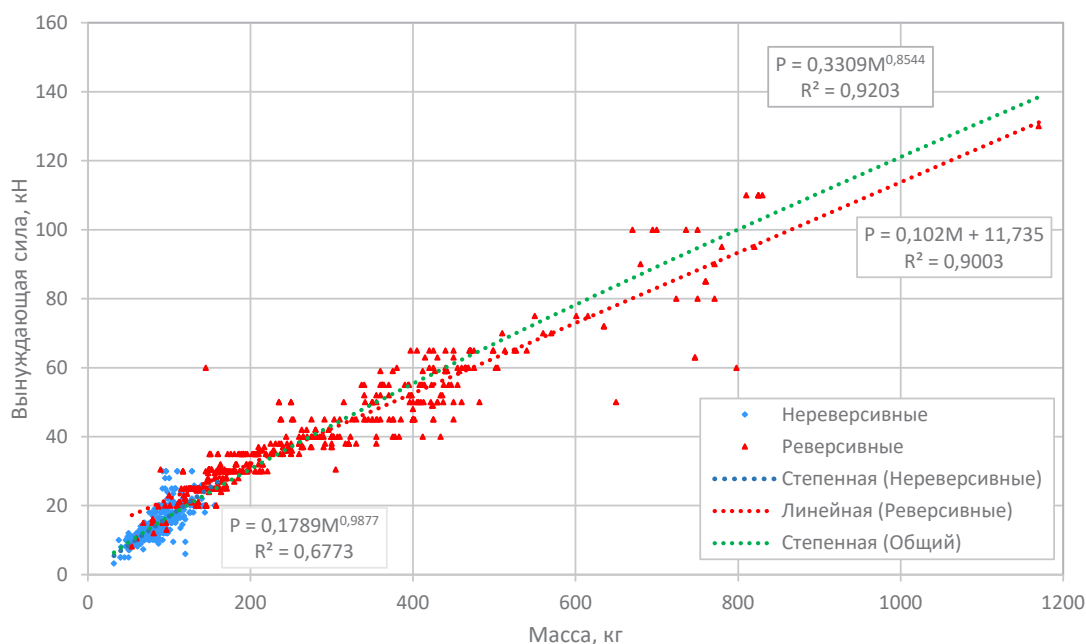


Рисунок 2 – Взаимосвязь массы (M , кг) и вынуждающей силы (P , кН) реверсивных и нереверсивных виброплит
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Correlation between mass (M , kg) and driving force (P , kN) of reversible and forward plate compactors
Source: compiled by the authors.

Из данных, представленных на рисунках 4, 5, 6, 7, 8, 9, следует, что нереверсивные виброплиты занимают весьма ограниченный диапазон масс – от 32 до 160 кг. Реверсивные виброплиты занимают диапазон масс от 54 до 1170 кг, что почти полностью перекрывает диапазон масс нереверсивных моделей.

Вынуждающая сила виброплит обоих типов возрастает с увеличением их массы (см. рисунок 2). Общая для обоих типов виброплит линия регрессии имеет степенную зависимость и достаточно высокий коэффициент детерминации (таблица 2).

Для нереверсивных виброплит выраженной зависимости частоты колебаний вибровозбудителя от массы не наблюдается (см. рисунок 3). Что касается общего диапазона значений реверсивных и нереверсивных виброплит, то здесь можно отметить, что с увеличением массы виброплиты частота колебаний вибровозбудителя снижается. Таким образом, для реверсивных виброплит в целом характерны более низкие частоты колебаний, чем для нереверсивных моделей.

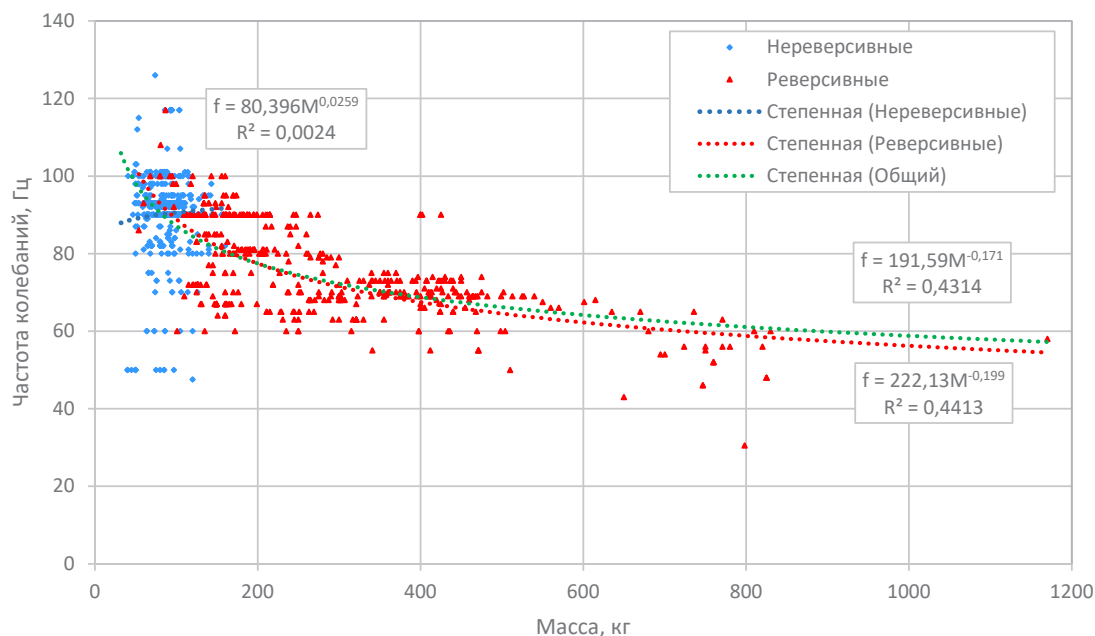


Рисунок 3 – Взаимосвязь массы (M , кг) и частоты колебаний (f , Гц) реверсивных и неревверсивных виброплит
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Correlation between mass (M , kg) and oscillation frequency (f , Hz) of reversible and forward plate compactors
Source: compiled by the authors.

Мощность двигателя реверсивных и неревверсивных виброплит возрастает с увеличением их массы (см. рисунок 4). При этом большинство неревверсивных виброплит и зна-

чительная часть реверсивных моделей имеют мощность в диапазоне от 3 до 5 кВт, который соответствует наиболее распространенным моделям бензиновых и дизельных двигателей.

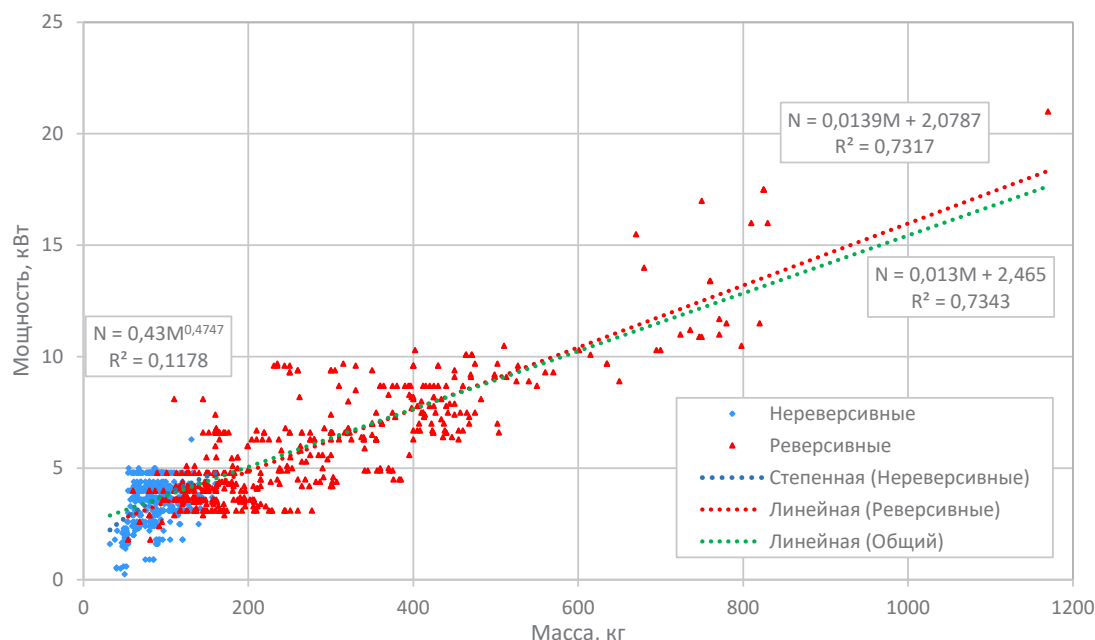


Рисунок 4 – Взаимосвязь массы (M , кг) и мощности (N , кВт) реверсивных и неревверсивных виброплит
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Correlation between mass (M , kg) and engine power (N , kW) of reversible and forward plate compactors
Source: compiled by the authors.

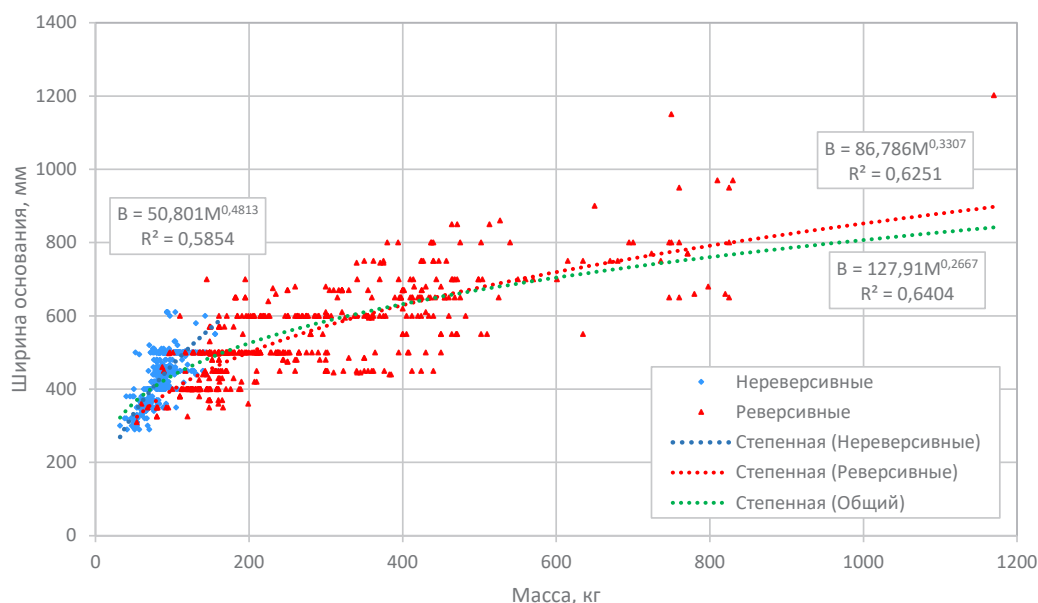


Рисунок 5 – Взаимосвязь массы (M , кг) и ширины основания (B , мм) реверсивных и неревверсивных виброплит
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Correlation between mass (M , kg) and base plate width (B , mm) of reversible and forward plate compactors
Source: compiled by the authors.

Ширина основания реверсивных и неревверсивных виброплит возрастает с увеличением массы (см. рисунок 5). Значительная часть виброплит обоих типов имеет ширину основания в 400 или 500 мм. Для реверсивных моделей также характерно значение в 600 мм.

Длина основания также возрастает с увеличением массы виброплит (см. рисунок 6). При этом для легких и сверхлегких виброплит (как реверсивных, так и неревверсивных) наблюдается значительный (в 2 и более раза) разброс значений длины основания при сопоставимых показателях массы.

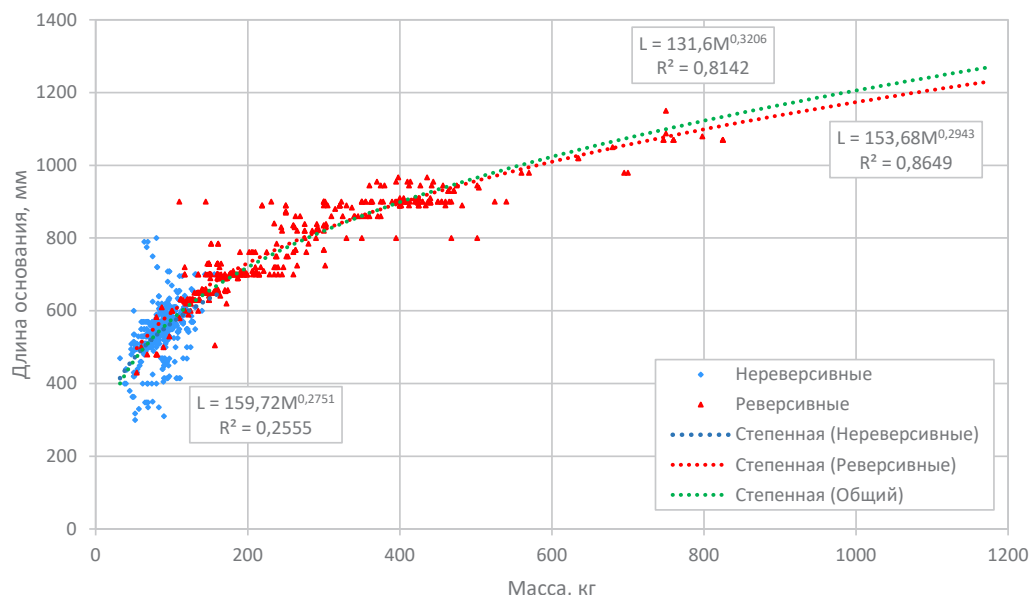


Рисунок 6 – Взаимосвязь массы (M , кг) и длины основания (B , мм) реверсивных и неревверсивных виброплит
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Correlation of mass (M , kg) and base plate length (B , mm) of reversible and forward plate compactors
Source: compiled by the authors.

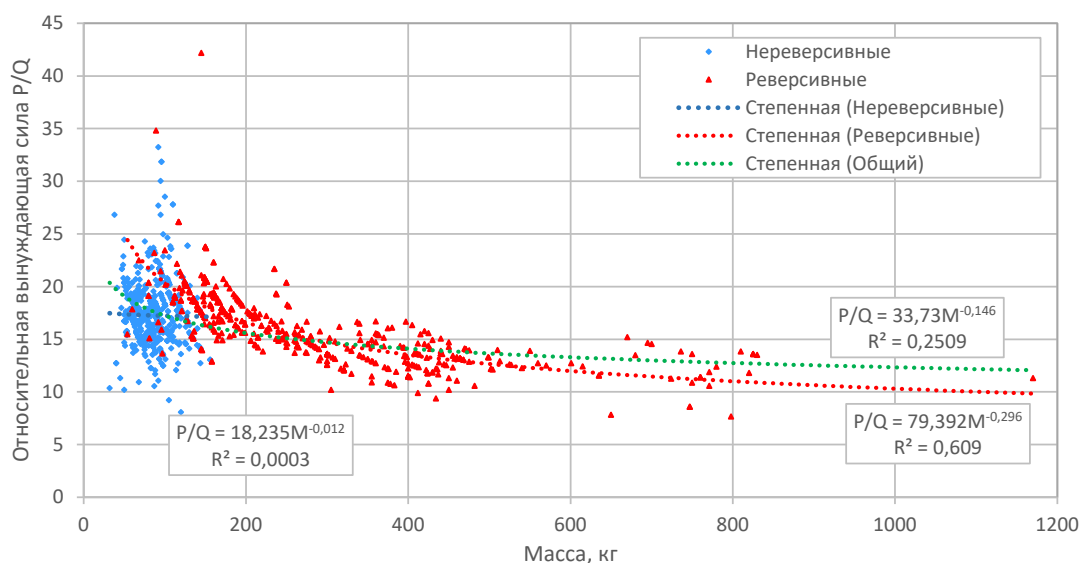


Рисунок 7 – Взаимосвязь массы (M , кг) и относительной вынуждающей силы реверсивных и нереверсивных виброплит
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Correlation between mass (M , kg) and relative driving force of reversible and forward plate compactors
Source: compiled by the authors.

Относительная вынуждающая сила нереверсивных виброплит не имеет выраженной зависимости от массы, в то время как относительная вынуждающая сила реверсивных виброплит снижается с увеличением массы. На рисунке 7 видно, что расположение точек (за исключением отдельных моделей) уклады-

вается в общую закономерность, при которой большему значению массы виброплиты соответствует меньшее значение относительной вынуждающей силы.

Полученные уравнения регрессии и коэффициенты детерминации приведены в таблице 2.

Таблица 2
Уравнения регрессии для различных типов виброплит
Источник: составлено авторами.

Table 2
Regression equations for different types of plate compactors
Source: compiled by the authors.

Тип виброплиты	Параметр	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации, R^2
Нереверсивные	Вынуждающая сила (P , кН)	$P = 0,1789M^{0,9877}$	0,6773
	Частота колебаний (f , Гц)	$f = 80,396M^{0,0259}$	0,0024
	Мощность двигателя (N , кВт)	$N = 0,43M^{0,4747}$	0,1178
	Ширина основания (B , мм)	$B = 50,801M^{0,4813}$	0,5854
	Длина основания (L , мм)	$L = 159,72M^{0,2751}$	0,2555
	Относительная вынуждающая сила (P/Q)	$P/Q = 18,235M^{-0,012}$	0,0003
Реверсивные	Вынуждающая сила (P , кН)	$P = 0,7788M^{0,7045}$	0,8987
	Частота колебаний (f , Гц)	$f = 222,13M^{-0,199}$	0,4413
	Мощность двигателя (N , кВт)	$N = 0,0139M + 2,0787$	0,7317
	Ширина основания (B , мм)	$B = 87,717M^{0,3291}$	0,6143
	Длина основания (L , мм)	$L = 153,68M^{0,2943}$	0,8649
	Относительная вынуждающая сила (P/Q)	$P/Q = 79,392M^{-0,296}$	0,6096

Тип виброплиты	Параметр	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации, R^2
Общий	Вынуждающая сила (P, кН)	$P = 0,3309M^{0,8544}$	0,9203
	Частота колебаний (f, Гц)	$f = 191,59M^{-0,171}$	0,4314
	Мощность двигателя (N, кВт)	$N = 0,013M + 2,465$	0,7343
	Ширина основания (B, мм)	$B = 127,91M^{0,2667}$	0,6404
	Длина основания (L, мм)	$L = 131,6M^{0,3206}$	0,8142
	Относительная вынуждающая сила (P/Q)	$P/Q = 33,73M^{-0,146}$	0,2509

ОБСУЖДЕНИЕ

Несмотря на большое разнообразие выпускаемых моделей неререверсивных виброплит, все они сосредоточены в достаточно узком диапазоне масс от 32 до 160 кг. Диапазон значений масс реверсивных виброплит гораздо более широк и находится в пределах 54...1170 кг, почти полностью перекрывая диапазон значений масс неререверсивных моделей.

Полученные регрессионные зависимости вынуждающей силы, мощности двигателя, ширины и длины основания для реверсивных и неререверсивных виброплит имеют схожий характер в соответствующих диапазонах масс.

В то же время диапазоны изменения значений частоты колебаний вибровозбудителя для неререверсивных и реверсивных виброплит существенно различаются в соответствующих диапазонах масс. При этом для неререверсивных виброплит наблюдается значительный (в 2,5 раза) разброс значений частоты колебаний для моделей аналогичной массы и очень низкий коэффициент детерминации.

Диапазон значений относительной вынуждающей силы реверсивных и неререверсивных виброплит несколько различаются в соответствующих диапазонах масс. Для неререверсивных виброплит разброс показателя относительной вынуждающей силы превышает четырёхкратные значения.

Высокие ($R^2=0,75...0,9$) и очень высокие ($R^2>0,9$) значения коэффициента детерминации наблюдаются только для регрессионных зависимостей вынуждающей силы и длины основания от массы (за исключением соответствующих зависимостей для неререверсивных виброплит).

Полученные регрессионные зависимости длины основания от массы виброплит, хотя и отражают общие закономерности, сами по себе малоприспособны для дальнейших исследований, поскольку длина основания может существенно отличаться от длины опорной поверхности.

Неререверсивные и реверсивные виброплиты имеют разный механизм передвижения и взаимодействия основания с грунтом. Отсюда можно сделать предположение о различии в значениях амплитудных контактных напряжений и их распределении по опорной поверхности реверсивных и неререверсивных виброплит. Данный вопрос требует отдельного более подробного исследования.

Очень высокие значения относительной вынуждающей силы P/Q (большинство моделей характеризуются значением $P/Q = 10...25$) должны приводить к ярко выраженному отрывному характеру колебаний виброплиты на грунте, сопровождающемуся малой продолжительностью времени контакта с грунтом и, как следствие, низкой уплотняющей способностью, плохой управляемостью и высокими динамическими нагрузками на элементы виброплиты. Для увеличения продолжительности взаимодействия виброплиты с грунтом необходимо ограничение размаха колебаний основания виброплиты. Если рассматривать виброплиту как трёхмассную колебательную систему^{4,5}, рабочий орган (основание виброплиты) совершает вертикальные колебания между двумя подвижными ограничителями. В качестве верхнего ограничителя выступает рама виброплиты с установленным на ней двигателем. Верхний ограничитель (рама с двигателем) связан с рабочим органом упру-

⁴ Susante P., Mooney M. Capturing Nonlinear Vibratory Roller Compactor Behavior through Lumped Parameter Modeling // Journal of Engineering Mechanics. 1996. С. 684–693.

⁵ Тюремнов И.С., Морев А.С., Фурманов Д.В. К вопросу обоснования значения присоединённой массы грунта при реологическом моделировании процесса уплотнения грунта вибрационным катком // Проблемы машиноведения: материалы III Международной научно-технической конференции, Омск, 23–24 апреля 2019 года. Том Часть I. Омск: Омский государственный технический университет, 2019. С. 215–223. EDN MVJSLI.

го-вязкими связями (амортизаторами). В качестве нижнего ограничителя выступает деформируемый грунт.

Таким образом, при очень высоких значениях относительной вынуждающей силы, генерируемой вибровозбудителем рабочего органа, ограничение размаха его вертикальных колебаний при известных свойствах нижнего ограничителя (грунта) возможно за счет:

- увеличения массы верхнего ограничителя (рамы, выступающей в роли «пригруза»);
- оптимизации характеристик амортизаторов рамы;
- увеличения массы рабочего органа (т.е. увеличения инерционной составляющей сопротивления его перемещению);
- увеличения частоты колебаний рабочего органа (также приводящей к увеличению инерционной составляющей сопротивления перемещению рабочего органа, только за счет возрастания ускорения, а не массы, принимающих участие в формировании силы инерционного сопротивления).

Это объясняет наблюдаемое для всех типов виброплит (а также и для других типов грунтоуплотняющих машин ударно-вибрационного действия [25]) увеличение частоты колебаний при уменьшении массы виброплит. При уменьшении массы виброплиты одновременно уменьшается масса рабочего органа и масса рамы («пригруза»), что должно приводить к уменьшению инерционных сопротивлений движению основания виброплиты, увеличению размаха вертикальных колебаний рабочего органа и ухудшению уплотняющей способности и управляемости виброплиты. Увеличение же частоты колебаний приводит к увеличению инерционного сопротивления передвижению рабочего органа в вертикальном направлении и выступает в роли ограничителя размаха вертикальных колебаний виброплиты. Вышеизложенные соображения позволяют объяснить наблюдаемые при анализе технических характеристик виброплит закономерности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, при выполнении дальнейших исследований желательно разделять нереверсивные и реверсивные виброплиты, поскольку они по-разному взаимодействуют с грунтом, находятся в различных диапазонах масс и имеют несколько различные диапазоны значений относительной вынуждающей силы.

Для большинства построенных регрессионных зависимостей наблюдаются средние и

низкие значения коэффициента детерминации. Это может говорить о том, что у производителей отсутствуют методики, позволяющие обосновать выбор технических характеристик реверсивных и нереверсивных виброплит.

Для большинства моделей виброплит значение относительной вынуждающей силы не опускается ниже 8 во всем диапазоне масс, что существенно превышает критические значения P/Q , установленные Н.Я. Хархутой. Это говорит о том, что все рассмотренные виброплиты реализуют ярко выраженный отрывной характер взаимодействия с грунтом. Причем в промежуток времени между ударами опорной плиты о грунт дебалансный вал может совершать 2 и более оборотов. Данный факт должен обязательно учитываться при разработке математической модели взаимодействия виброплиты с грунтом.

С учетом очень высоких значений относительной вынуждающей силы и отрывного характера взаимодействия виброплиты с грунтом открываются возможности для улучшения уплотняющих возможностей виброплит за счет оптимизации соотношения масс рамы и основания виброплиты, а также обоснования характеристик амортизаторов с целью обеспечения требуемой для эффективного уплотнения грунта продолжительности действия контактных напряжений в рамках разрабатываемой методики [26].

Полученные регрессионные зависимости позволяют учесть существующий опыт разработки реверсивных и нереверсивных виброплит, и могут быть применены, в том числе для обоснования ширины основания, мощности двигателя и вынуждающей силы вибровозбудителя.

Технические характеристики реверсивных и нереверсивных виброплит частично связаны с их конструктивными особенностями (например, механизмом регулирования скорости и направления движения), что требует отдельного анализа. Также целесообразно проведение отдельного исследования взаимосвязи технических характеристик виброплит с их технологическими возможностями.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тюремнов И.С., Новичихин А.А. Уплотнение грунтов вибрационными плитами: монография. Ярославль: Издат. дом ЯГТУ, 2018. 143 с.
2. Кузьмичев В.А., Кузьмичев В.Д. Исследование рабочих параметров самоходных виброплит, применяемых при уплотнении грунтов // Вестник гражданских инженеров. 2011. № 3(28): 66–71.

3. Кузьмичев В.Д. Математическая модель виброплиты // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 3(35): 65–68.
4. Massarsch K. Rainer, Wersäll Carl. Vibratory plate resonance compaction. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering. 2019. 173. 1-30. <https://doi.org/10.1680/jgeen.19.00169>
5. Sawant Rohan. Advance Equipment for Compaction on Site.2021 <https://doi.org/10.35291/2454-9150.2021.0099>
6. Рябов Г.К., Леонтьева В.С., Федосеев Ю.В. О механизме передвижения бесколесной виброплиты // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2012. № 3(96): 143.
7. Башкарев А.Я., Мусияко Д.В., Пешков В.С. Вибрационное перемещение поверхностного уплотнителя // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2013. № 1(166): 175–178.
8. Кузьмичев В.Д. Разработка динамической модели самоходной нереверсивной виброплиты // Механика XXI века. 2012. № 11:39–45.
9. Czech Krzysztof, Gosk, Wojciech. The Impact of Work of Hydraulic Compactor Type V8 from MTS on the Level of Vibrations Propagated to the Environment. Procedia Engineering. 2017. 189:478-483. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.077>
10. Anderegg Roland, Kaufmann, Kuno. Compaction Monitoring Using Intelligent Soil Compactors. GeoCongress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age. 2006. [https://doi.org/10.1061/40803\(187\)41](https://doi.org/10.1061/40803(187)41)
11. Sivagnanasuntharam Suthakaran, Sounthararajah, Arooran, Kodikara, Jayantha. A New Approach to Maximising the Benefits of Current Intelligent Compaction Technology for Asphalt Materials. Construction and Building Materials.2023. 393. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132031>
12. Ranasinghe Rajitha, Sounthararajah Arooran, Kodikara Jayantha. An Intelligent Compaction Analyzer: A Versatile Platform for Real-Time Recording, Monitoring, and Analyzing of Road Material Compaction. Sensors. 2023: 23. 7507. <https://doi.org/10.3390/s23177507>
13. Owusu-Nimo Frederick, Peprah-Manu Daniel, Ayeh Felix, Charkley Frederick, Ampadu Samuel. Compaction Verification of Lateritic Soil Using Electrical Resistivity: A Laboratory Study. Geotechnical and Geological Engineering.2023; 1-14. <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02598-z>
14. Hassan Asem, Nadhum Gehan Geotechnical-Electrical Evaluation of Soil Compaction Parameters, South of Baqubah City. Iraqi Geological Journal. 2023; 56. 144-155. <https://doi.org/10.46717/igj.56.1D.12ms-2023-4-21>
15. Yao Yangping, Song ErBo. Intelligent compaction methods and quality control. Smart Construction and Sustainable Cities.2023; 1. <https://doi.org/10.1007/s44268-023-00004-4>
16. Aodah Haider, Chandra Satish. Intelligent Compaction Technology.2018;
17. 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. <https://doi.org/10.3934/era.2023140>
18. Xu Tianyu, Zhou Zhijun, Yan Ruipeng, Zhang Zhipeng, Zhu Linxuan, Chen Chaoran, Fu Xu, Liu Tong. Real-Time Monitoring Method for Layered Compaction Quality of Loess Subgrade Based on Hydraulic Compactor Reinforcement. Sensors. 2020;20. 4288. <https://doi.org/10.3390/s20154288>
19. Zhang Zhipeng, Zhou Zhijun, Guo Tao, Xu Tianyu, Zhu Linxuan, Fu Xu, Chen Chaoran, Liu Tong. A measuring method for layered compactness of loess subgrade based on hydraulic compaction. Measurement Science and Technology. 2021; 32. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/abd7ab>
20. Hou Ziyi, Dang Xiao, Yuan Yezhen, Tian Bo, Li Sili. Research on Intelligent Compaction Technology of Subgrade Based on Regression Analysis. Advances in Materials Science and Engineering. 2021. 1-9. <https://doi.org/10.1155/2021/4100896>
21. Мусияко Д.В., Расулов Р.А. Самоходная вибраторная плита с вальцем // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2016. № 4(43):73–80.
22. Anderegg Roland Automatische Verdichtungskontrolle: eine Anwendung der nichtlinearen Schwingungstheorie. 2018;
23. 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.
24. 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.
25. Тюремнов И.С. Анализ технических характеристик различных типов ударно-вибрационных грунтоуплотняющих машин // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 6(94):706–716. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-706-716>. EDN IGOKXE.
26. Тюремнов И.С. О разработке методологии прогнозирования технологических возможностей ударно-вибрационных грунтоуплотняющих машин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 9:689–692. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-9-689-690>

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. Kuz'michev V.A., Kuz'michev V.D. Issledovanie rabochikh parametrov samokhodnykh vibroplit, primenyaemykh pri uplotnenii gruntov. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2011; № 3(28): 66-71.
3. Kuz'michev V.D. Matematicheskaya model' vibroplity // *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye*. 2012. № 3(35):65-68.
4. Massarsch K. Rainer, Wersäll Carl. Vibratory plate resonance compaction. Proceedings of the Institution of Civil Engineers . *Geotechnical Engineering*. 2019; 173. 1-30. <https://doi.org/10.1680/jgeen.19.00169>
5. Sawant Rohan Advance Equipment for Compaction on Site. 2021; <https://doi.org/10.35291/2454-9150.2021.0099>
6. Ryabov G.K., Leont'eva V.S., Fedoseev YU.V. O mekhanizme peredvizheniya beskolesnoy vibroplity. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*. 2012; № 3(96): 143.
7. Bashkarev A.YA., Musiyako D.V., Peshkov V.S. Vibratsionnoye peremeshchenie poverkhnostnogo uplotnitelya. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2013; № 1(166):175-178.
8. Kuz'michev V.D. Razrabotka dinamicheskoy modeli samokhodnoy nereversivnoy vibroplity. *Mekhanika XXI veku*. 2012. № 11:S. 39-45.
9. Czech Krzysztof, Gosk Wojciech. The Impact of Work of Hydraulic Compactor Type V8 from MTS on the Level of Vibrations Propagated to the Environment. *Procedia Engineering*. 2017; 189. 478-483. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.077>
10. Anderegg Roland, Kaufmann Kuno. Compaction Monitoring Using Intelligent Soil Compactors. *GeoCongress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age*. 2006. [https://doi.org/10.1061/40803\(187\)41](https://doi.org/10.1061/40803(187)41)
11. Sivagnanasuntharam Suthakaran, Sountharajah Arooran, Kodikara Jayantha. A New Approach to Maximising the Benefits of Current Intelligent Compaction Technology for Asphalt Materials. *Construction and Building Materials*. 2023; 393. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132031>
12. Ranasinghe Rajitha, Sountharajah Arooran, Kodikara Jayantha. An Intelligent Compaction Analyzer: A Versatile Platform for Real-Time Recording, Monitoring, and Analyzing of Road Material Compaction. *Sensors*. 2023; 23. 7507. <https://doi.org/10.3390/s23177507>
13. Owusu-Nimo Frederick, Peprah-Manu Daniel, Ayeh Felix, Charkley Frederick, Ampadu Samuel. Compaction Verification of Lateritic Soil Using Electrical Resistivity: A Laboratory Study. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2023;1-14. <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02598-z>
14. Hassan Asem, Nadhum Gehan. Geotechnical-Electrical Evaluation of Soil Compaction Parameters, South of Baqubah City. *Iraqi Geological Journal*. 2023; 56. 144-155. <https://doi.org/10.46717/igj.56.1D.12ms-2023-4-21>
15. Yao Yangping, Song Er.Bo. Intelligent compaction methods and quality control. *Smart Construction and Sustainable Cities*.2023; 1. <https://doi.org/10.1007/s44268-023-00004-4>
16. Aodah Haider, Chandra Satish. Intelligent Compaction Technology.2018;
17. 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. <https://doi.org/10.3934/era.2023140>
18. Xu Tianyu, Zhou Zhijun, Yan Ruipeng, Zhang Zhipeng, Zhu Linxuan, Chen Chaoran, Fu Xu, Liu Tong. Real-Time Monitoring Method for Layered Compaction Quality of Loess Subgrade Based on Hydraulic Compactor Reinforcement. *Sensors*. 2020;20. 4288. <https://doi.org/10.3390/s20154288>
19. Zhang Zhipeng, Zhou Zhijun, Guo Tao, Xu Tianyu, Zhu Linxuan, Fu Xu, Chen Chaoran, Liu Tong. A measuring method for layered compactness of loess subgrade based on hydraulic compaction. *Measurement Science and Technology*.2021; 32. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/abd7ab>
20. Hou Ziyi, Dang Xiao, Yuan Yezhen, Tian Bo, Li Sili. Research on Intelligent Compaction Technology of Subgrade Based on Regression Analysis. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2021. 1-9. <https://doi.org/10.1155/2021/4100896>
21. Musiyako D.V., Rasulov R.A. Samokhodnaya vibratsionnaya plita s val'tsem. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2016; № 4(43): 73-80.
22. Anderegg Roland Automatische Verdichtungskontrolle: eine Anwendung der nichtlinearen Schwingungstheorie. 2018;
23. 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.
24. 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.
25. Tyuremnov I.S. Analiz tekhnicheskikh kharakteristik razlichnykh tipov udarno-vibratsionnykh gruntouplotnyayushchikh mashin. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*. 2023; T. 20, № 6(94): 706-716. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-706-716>. EDN IGOKXE.
26. Tyuremnov I.S. O razrabotke metodologii prognozirovaniya tekhnologicheskikh vozmozhnostey udarno-vibratsionnykh gruntouplotnyayushchikh mashin. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2024; № 9:689-692. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-9-689-690>

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Афанасьев М.А. Сбор информации технических характеристиках самоходных виброплит, обработка данных, подготовка текста статьи.

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

COAUTHORS' CONTRIBUTION

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

Tyuremnov I.S. Research design and general organization, 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: <http://orcid.org/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: <http://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 Machines Department, Yaroslavl State Technical University (88, Moskovskiy Proezd, Yaroslavl, 150023).

ORCID: <http://orcid.org/0009-0005-5095-2557>,

SPIN-code: 8256-8500,

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

Tyuremnov Ivan S. – Cand. of Sci. (Engineering), 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