

Научная статья

УДК 625.76.08

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-488-501>

EDN: BRYOWT



СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК САМОХОДНЫХ НЕРЕВЕРСИВНЫХ ВИБРОПЛИТ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ДВИГАТЕЛЕЙ

М.А. Афанасьев ✉, И.С. Тюремнов

Ярославский государственный технический университет,
г. Ярославль, Россия

✉ ответственный автор

afanasiev.m.a2016@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Неревверсивные виброплиты – поверхностные грунтоуплотняющие машины с плоским рабочим органом, оснащенные, как правило, однофазным вибровозбудителем круговых колебаний. Привод виброплит может осуществляться от бензиновых, дизельных или электрических двигателей. При проектировании и модернизации неревверсивных виброплит возникают задачи обоснования их технических характеристик: вынуждающей силы и частоты колебаний вибровозбудителя, мощности двигателя, ширины основания и др. Для обобщения многолетнего опыта производителей и выявления взаимосвязей между основными техническими характеристиками неревверсивных виброплит был проведен статистический анализ параметров виброплит с различными типами двигателей.

Материалы и методы. Для выполнения статистического анализа использовались данные о характеристиках неревверсивных виброплит основных отечественных и зарубежных производителей, представленные на официальных сайтах компаний, а также на сайтах их дилеров. Общее количество рассмотренных моделей составило 644. Уравнения регрессии и коэффициенты детерминации получены в программе Microsoft Excel.

Результаты. Установлены диапазоны изменения параметров для неревверсивных виброплит с различными типами двигателей. Получены уравнения регрессии взаимосвязи значений частоты колебаний и вынуждающей силы вибровозбудителя, мощности двигателя, ширины основания и относительной вынуждающей силы от массы неревверсивных виброплит с различными типами двигателей. Определены соответствующие коэффициенты детерминации. Для большинства параметров наблюдаются низкие и очень низкие значения коэффициента детерминации вне зависимости от типа двигателя.

Заключение. Диапазоны изменения технических характеристик дизельных и бензиновых неревверсивных виброплит достаточно близки между собой. Диапазоны изменения технических характеристик электрических виброплит, в большинстве случаев, выходят за диапазоны изменения технических характеристик виброплит с двигателем внутреннего сгорания. Низкий коэффициент детерминации и большой разброс значений параметров свидетельствует об отсутствии у производителей методики обоснования технических характеристик виброплит. Представленные результаты целесообразно использовать для уточнения диапазонов изменения параметров и формулирования требований для математической модели работы самоходных неревверсивных виброплит.

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

Статья поступила в редакцию 29.12.2023; одобрена после рецензирования 28.05.2024; принята к публикации 14.08.2024.

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. Статистический анализ технических характеристик самоходных неревверсивных виброплит с различными типами двигателей // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 4. С. 488-501. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-488-501>

© Афанасьев М.А., Тюремнов И.С., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-488-501>

EDN: BRYOWT

STATISTICAL ANALYSIS OF TECHNICAL SPECIFICATIONS OF FORWARD PLATE COMPACTORS WITH DIFFERENT TYPES OF ENGINES

Mikhail A. Afanasev ✉, Ivan S. Tyuremnov

Yaroslavl State Technical University,

Yaroslavl, Russia

✉ corresponding author

afanasiev.m.a2016@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. Forward plate compactors are surface soil compaction machines with a flat operating device, which are usually equipped with a single-shaft vibration exciter. Forward plate compactors may be driven by gasoline, diesel or electric engines. When designing and modernizing forward plate compactors, a problem of technical specifications justification may arise, including such parameters as exciting force, vibration exciter oscillation frequency, engine power, base plate width, etc. This statistical analysis of plate compactors with different types of engines was carried out to summarize manufacturers practices and reveal correlations between the technical specifications of forward plate compactors.

Materials and methods. This research is based on the information presented on the official websites of forward plate compactors manufacturers and their dealers. 644 models of forward plate compactors were scrutinized. Regression equations and correlation coefficients were derived using Microsoft Excel software.

Results. Parameters ranges for forward plate compactors with different types of engines were determined. Regression equations of correlations between oscillation frequency, exciting force, engine power, base plate width, relative exciting force and mass of forward plate compactors with different types of engines were derived, as well as the corresponding correlation coefficients. It was revealed, that most parameters have low or very low correlation coefficient, regardless of the engine type.

Conclusion. The ranges of the technical specifications of diesel and gasoline forward plate compactors are quite close to each other. The parameters ranges of electric plate compactors, in most cases, are beyond the ranges of gasoline and diesel plate compactors. Low correlation coefficients and a large scatter of parameters indicate that manufacturers do not have a methodology for justification of the technical specifications of forward plate compactors. Results of the study may be used when clarify ranges of parameters and formulate requirements for a mathematical model of vibration plates behavior.

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

The article was submitted 29.12.2023; approved after reviewing 28.05.2024; accepted for publication 14.08.2024.

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. Statistical analysis of technical specifications for non-reversible plate vibrators with different types of engines. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (4): 488-501. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-488-501>

© Afanasev M.A., Tyuremnov I.S., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

Уплотнение грунта является важной технологической операцией при возведении земляного полотна автомобильных и железных дорог, плотин, оснований фундаментов и т.д. Соблюдение технологии уплотнения обеспечивает формирование структуры грунта, сохраняющей прочность и геометрическую форму грунтового сооружения при воздействии механических нагрузок и погодноклиматических факторов.

Уплотнение грунта может осуществляться с использованием различных видов грунтоуплотняющих машин (ГУМ): грунтовых катков статического и вибрационного действия, траншейных виброкатков, самоходных реверсивных и нереверсивных виброплит, навесных экскаваторных виброплит, вибротрамбовок, трамбующих машин и др.

Самоходные виброплиты (далее – виброплиты) – это грунтоуплотняющие машины с плоским рабочим органом, который вводится в состояние колебательных движений и перемещается по поверхности грунта¹. Промышленно выпускаемые виброплиты оснащаются бензиновым, дизельным или электрическим двигателем. В зависимости от способа передвижения выделяют нереверсивные и реверсивные виброплиты.

Особенностью нереверсивных виброплит является наличие только одного дебалансного вала, в результате чего они могут двигаться только вперед [1]. Это усложняет маневрирование и приводит к тому, что распределение контактных напряжений по площади опорной поверхности виброплиты происходит неравномерно [2]. В то же время, благодаря своей простоте и дешевизне, нереверсивные виброплиты являются наиболее распространенным типом поверхностных ГУМ.

Нереверсивные виброплиты используются для уплотнения дорожных покрытий и несвязных грунтов слоями небольшой толщины. Как правило, такие машины применяются в качестве дополнения к другим видам дорожно-строительной техники и обеспечивают уплотнение тех участков, где невозможно использование более крупного оборудования: в траншеях, у бровок насыпей, в пазухах фундамента и т.д.

К основным параметрам виброплит, определяющим их силовое воздействие на уплотняемый грунт, относятся: масса (M , кг), вынуждающая сила (P , кН) и частота колебаний (f , Гц). Помимо абсолютного значения вынуждающей силы P , для описания характера работы виброплит полезно использовать относительную вынуждающую силу, которая определяется как отношение вынуждающей силы P к весу виброплиты Q , т.е. P/Q . Мощность двигателя (N , кВт) является важной характеристикой виброплит, поскольку этот показатель влияет на текущие затраты на эксплуатацию оборудования, а также на преодолеваемый уклон. Геометрические размеры основания виброплиты влияют на ее производительность сложным образом: увеличение длины опорной поверхности приводит к увеличению циклов приложения нагрузки в одной точке грунта за один проход, но снижает контактные напряжения. Увеличение ширины опорной поверхности (которая, как правило, равна ширине основания) также приводит к уменьшению контактных напряжений, но позволяет увеличить ширину полосы уплотнения. Глубина уплотнения связана с минимальным размером контактной поверхности².

Современные исследования вибрационных ГУМ, и виброплит в частности, сосредоточены на совершенствовании методов контроля качества уплотнения и внедрении так называемых систем «интеллектуального уплотнения» [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14], повышении вибрационной безопасности оборудования [15], снижении его себестоимости и повышении производительности [16, 17]. Ряд работ исследуют условия обеспечения самоходности и динамику нереверсивных виброплит [18, 19, 20].

Вместе с тем влияние основных параметров виброплит на их технологические возможности остается недостаточно изученным. Это создает трудности при обосновании технических характеристик виброплит при их проектировании или модернизации. Также возникают проблемы с обоснованием выбора модели виброплит для работы в различных технологических условиях (определяемых сочетанием влажности грунта, толщины уплотняемого слоя и требуемого коэффициента уплотнения) и необходимого числа проходов. В результате

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

² Там же.

повышается риск снижения качества уплотнения, уменьшается энергоэффективность грунтоуплотняющего оборудования и повышаются текущие затраты на его эксплуатацию.

Существуют исследования, направленные на изучение взаимосвязей между основными параметрами самоходных виброплит [1, 21, 22, 23, 24]. Профессором Н.Я. Хархутой и инженером Ю.Я. Андрейченко были установлены зависимости частоты колебаний вибровозбудителей и относительной вынуждающей силы виброплит от веса [21]. Однако результаты этой работы не применимы к современным моделям виброплит, поскольку частоты колебаний и относительные вынуждающие силы используемых в настоящее время виброплит значительно (в 2...3 раза) превышают показатели, описанные в исследовании [21]. В более современных работах [1, 22, 23, 24] используется достаточно ограниченная выборка и не учитывается влияние типа двигателя на технические характеристики виброплит.

Цель данного исследования – сбор и систематизация данных о технических характеристиках современных нереверсивных виброплит с различными типами двигателей, а также установление взаимосвязей между их основными параметрами, формулирование требований к математической модели, описывающей взаимодействие основных элементов нереверсивной виброплиты между собой и с грунтом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для выполнения статистического анализа использовались данные о технических характеристиках нереверсивных виброплит, представленные на официальных сайтах компаний-производителей, а также на сайтах их дилеров. Для обработки данных и получения уравнений регрессии использовалась программа Microsoft Excel.

В статистическом анализе рассматривались 644 модели 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. Из 644 рассмотренных моделей 53 произведены на территории СНГ (Россия, Беларусь), 303 – в КНР и 288 – в других странах (Великобритания, Германия, Израиль, Испания, Италия, США, Франция, Чехия, Швейцария, Швеция, Южная Корея, Япония). Из 644 рассмотренных моделей 551 оснащалась бензиновым двигателем, 62 – дизельным и 31 – электрическим.

При анализе технических характеристик самоходных нереверсивных виброплит в качестве основного параметра использовалась их масса.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Предварительный анализ технических характеристик нереверсивных виброплит показал, что тип двигателя оказывает существенное влияние на их основные параметры. Поэтому было принято решение разделить все модели нереверсивных виброплит на 3 группы в соответствии с типом применяемого двигателя (бензиновый, дизельный и электрический) и сравнить их между собой.

На рисунках 2, 3, 4, 5 приведены графики, демонстрирующие взаимосвязь массы виброплиты (M , кг) с вынуждающей силой (P , кН) (рисунок 1), частотой колебаний (f , Гц) (рисунок 2), мощностью двигателя (N , кВт) (рисунок 3), шириной основания (B , мм) (рисунок 4) и относительной вынуждающей силой P/Q (рисунок 5). Диапазоны изменений указанных параметров представлены в таблице 1.

Таблица 1
Диапазоны изменения параметров нереверсивных виброплит
Источник: составлено авторами.

Table 1
Range of parameters of forward plate compactors
Source: compiled by the authors.

Параметр	Тип двигателя		
	Бензиновые	Дизельные	Электрические
Масса плиты М, кг	32...160		
	32...160	69...156	40...143
Вынуждающая сила Р, кН	3,25...30		
	3,25...30	10...30	5...25
Частота колебаний f, Гц	47,5...126		
	60...126	80...117	47,5...112
Мощность двигателя N, кВт	0,25...6,3		
	1,4...6,3	2,5...4,4	0,25...3,1
Ширина основания В, мм	290...610		
	290...610	340...610	300...600
Относительная вынуждающая сила Р/Q	5,1...33,24		
	10,35...33,24	12,48...27,8	5,1...24,46

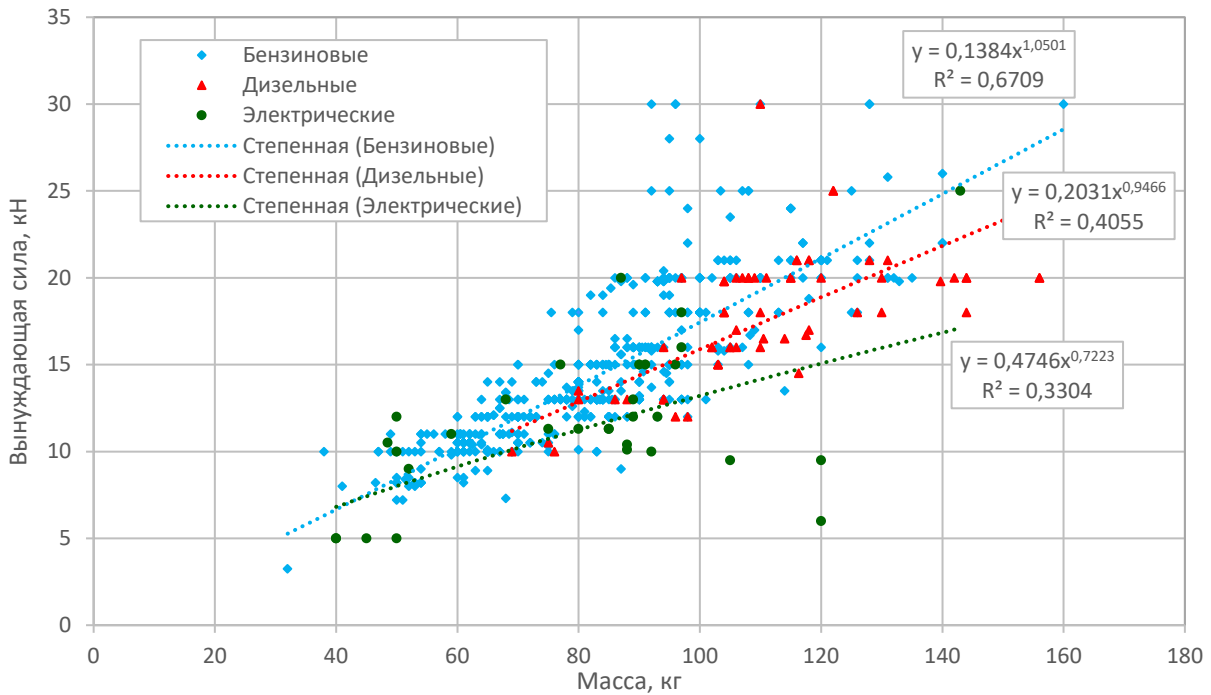


Рисунок 1 – Взаимосвязь массы (М, кг) и вынуждающей силы (Р, кН) нереверсивных виброплит
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Correlation between mass (M, kg) and exciting force (P, kN) of forward plate compactors
Source: compiled by the authors.

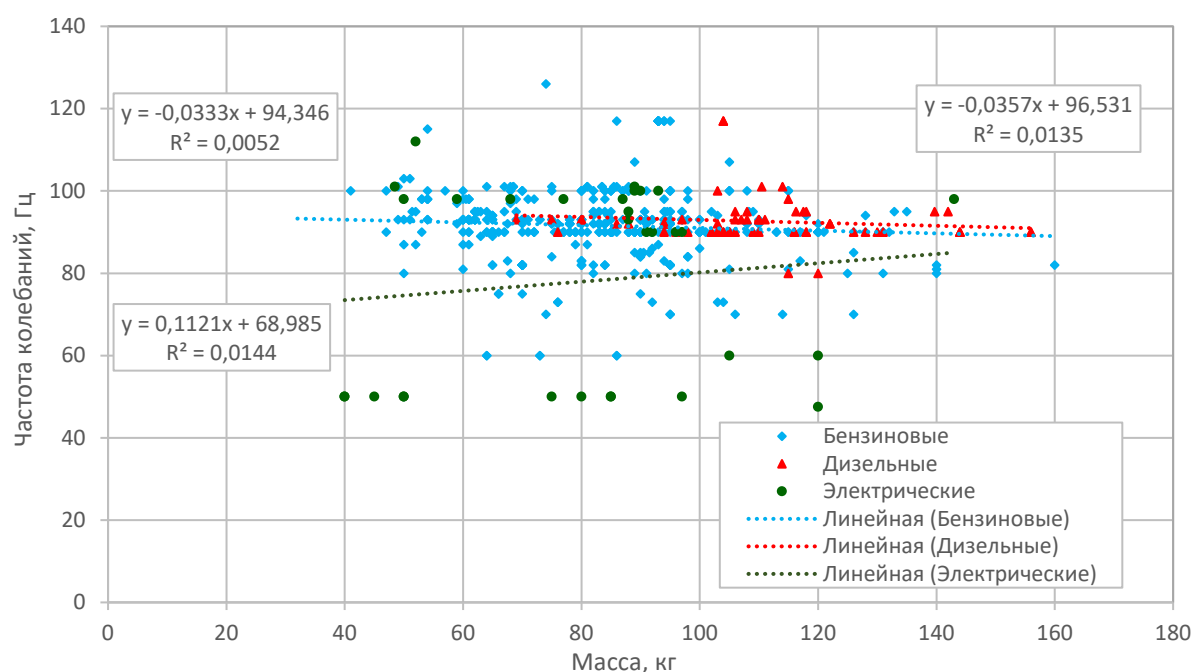


Рисунок 2 – Взаимосвязь массы (M , кг) и частоты колебаний (f , Гц) нереверсивных виброплит
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Correlation between mass (M , kg) and oscillation frequency (f , Hz) of forward plate compactors
Source: compiled by the authors.

Вынуждающая сила нереверсивных виброплит увеличивается с возрастанием их массы (рисунок 1). При этом нижняя граница диапазона изменения значений вынуждающей силы для бензиновых и дизельных моделей различается (3,25 кН и 10 кН соответственно), а верхняя – совпадает (30 кН). Масса дизельных моделей несколько выше, чем у бензиновых моделей с теми же значениями вынуждающей силы.

Диапазон значений вынуждающей силы для нереверсивных электрических виброплит зарубежного производства составляет 9...25 кН, что в целом совпадает с диапазоном вынуждающих сил виброплит с двигателями внутреннего сгорания (ДВС). Значения вынуждающей силы электрических виброплит, произведенных в России и Белоруссии, находится в пределах 5...11,3 кН, что примерно в 2 раза ниже, чем у зарубежных электрических виброплит.

Низкие значения коэффициентов детерминации свидетельствуют о достаточно большом разбросе значений вынуждающей силы при соответствующих значениях массы виброплит с различными типами двигателей. Характерным является не равномерное распределение

значений вынуждающей силы, а наличие ряда дискретных значений вынуждающей силы (10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 18, 20 кН), реализуемых в виброплитах различной массы с ДВС.

Частота колебаний серийно выпускаемых нереверсивных виброплит почти не зависит от их массы (рисунок 2). Для большинства виброплит характерна частота 90...100 Гц. В этом диапазоне частот находятся 72% всех рассмотренных моделей. Причем бензиновые модели виброплит отечественного и зарубежного производства, а также зарубежные электрические модели расположены в этом диапазоне частот (90...100 Гц) равномерно, а дизельные, вне зависимости от страны производства, находятся у нижней границы диапазона (90...95 Гц). Отдельно следует отметить электрические виброплиты марок Belle, Вибромаш, ЗУБР, Красный маяк и МИСОМ, поскольку они имеют частоту колебаний вибровозбудителя 47,5...60 Гц. Это связано с конструктивными особенностями указанных виброплит, поскольку в них передаточное число трансмиссии близко к единице, либо трансмиссия вообще отсутствует, а дебалансы установлены прямо на валу электродвигателя.

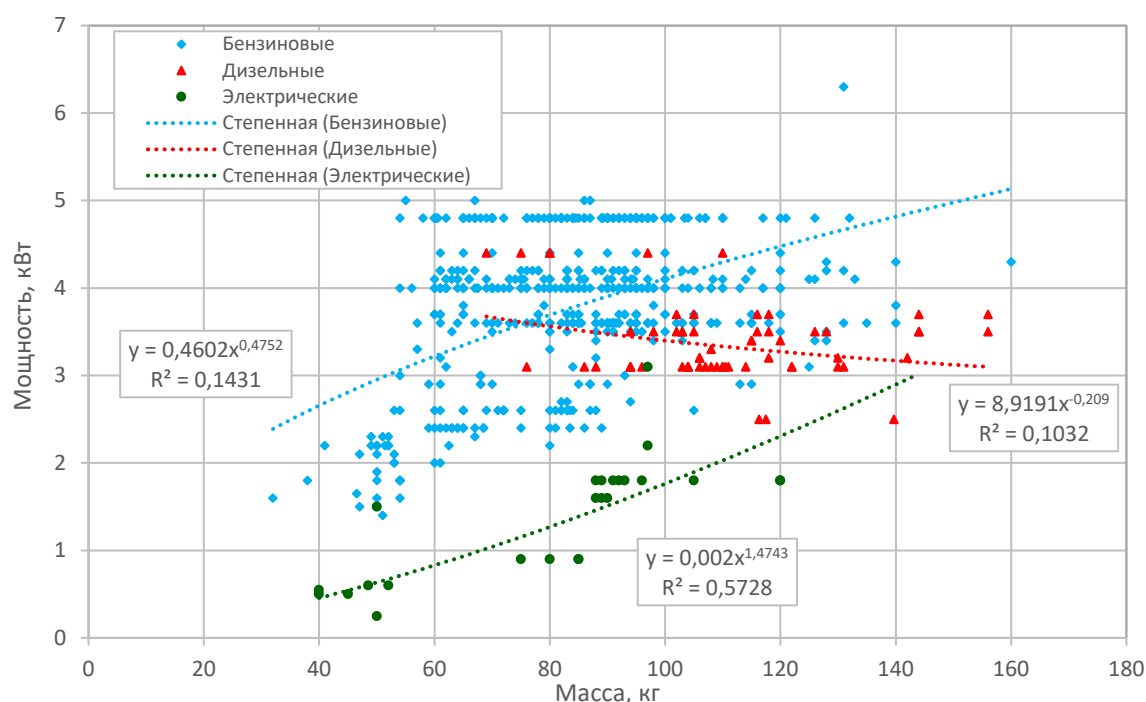


Рисунок 3 – Взаимосвязь массы (M , кг) и мощности (N , кВт) нереверсивных виброплит
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Correlation between mass (M , kg) and engine power (N , kW) of forward plate compactors
Source: compiled by the authors.

Очень низкие значения коэффициентов детерминации уравнений регрессии для частоты колебаний виброплит с различными типами двигателей не позволяют использовать полученные зависимости в практических целях.

Мощность двигателя нереверсивных электрических виброплит возрастает с увеличением их массы (см. рисунок 3). Для бензиновых и дизельных виброплит точки группируются вдоль горизонталей, что может быть обусловлено применением ограниченного количества моделей ДВС в виброплитах разной массы. Среди бензиновых моделей можно выделить 2 основные группы с мощностью ...3,6; 4,3 и 4,8 кВт, которые соответствуют наиболее популярным моделям двигателей Honda GX160 и GX200, а также их аналогам, производимым в КНР. Дизельные двигатели применяются в нереверсивных виброплитах ограниченно – в основном в моделях массой свыше 75 кг. При одинаковых значениях вынуждающей силы, частоты колебаний и размеров основания модели с дизельным двигателем имеют на 9...14% меньшую мощность и на 5...15% более высокую массу. Разброс точек, соответствующих моделям с дизельным двигателем, несколько меньше, чем у бензиновых. Что

касается электрических виброплит, то их мощность в среднем в 2 раза ниже, чем у аналогов сопоставимой массы с ДВС.

В связи с низкими значениями коэффициентов детерминации зависимостей мощности двигателя от массы нереверсивных виброплит с различными типами двигателей сложно говорить о достоверности полученных уравнений регрессии.

Ширина основания виброплиты возрастает с увеличением её массы (см. рисунок 4). При этом линия регрессии, описывающая характеристики электрических моделей, практически совпадает с линией регрессии для дизельных виброплит в соответствующих диапазонах масс. Для бензиновых моделей зависимость ширины основания от массы имеет более высокий коэффициент детерминации, а линия регрессии, описывающая такие виброплиты, не совпадает с линиями регрессии для электрических и дизельных моделей. Следует также отметить, что наиболее распространенная ширина основания нереверсивных виброплит составляет 500 мм. Такую ширину имеют 59% дизельных моделей и 28% всех виброплит вне зависимости от типа двигателя.

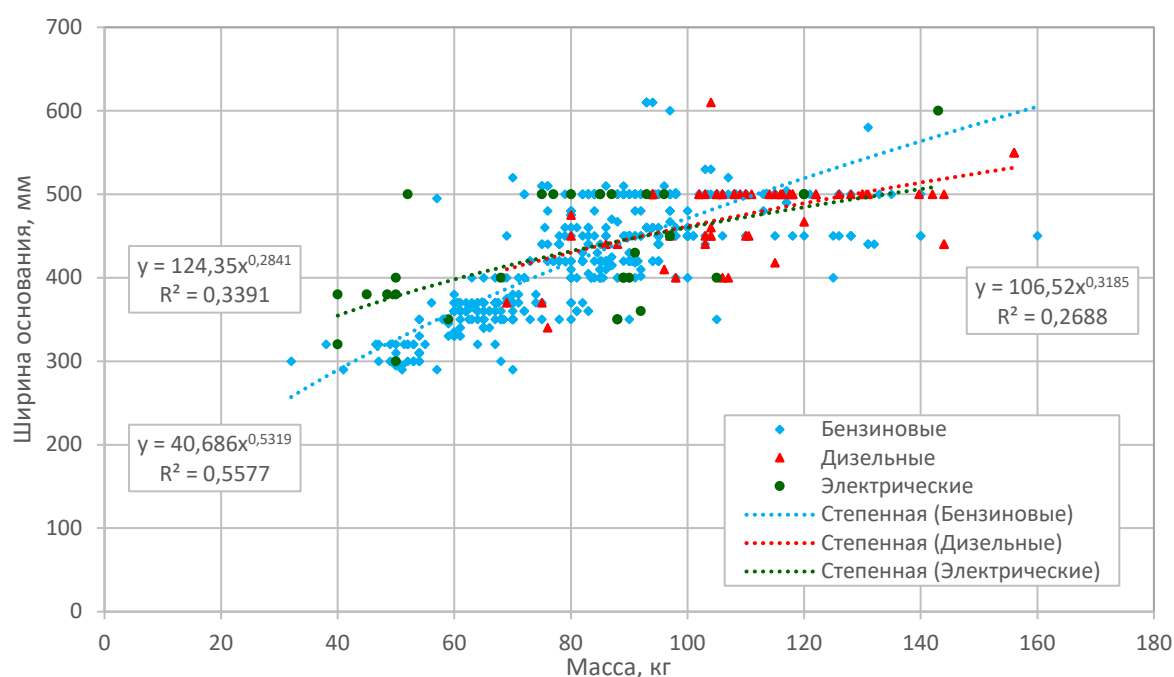


Рисунок 4 – Взаимосвязь массы (M , кг) и ширины основания (B , мм) нереверсивных виброплит
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Correlation between mass (M , kg) and base plate width (B , mm) of forward plate compactors
Source: compiled by the authors.

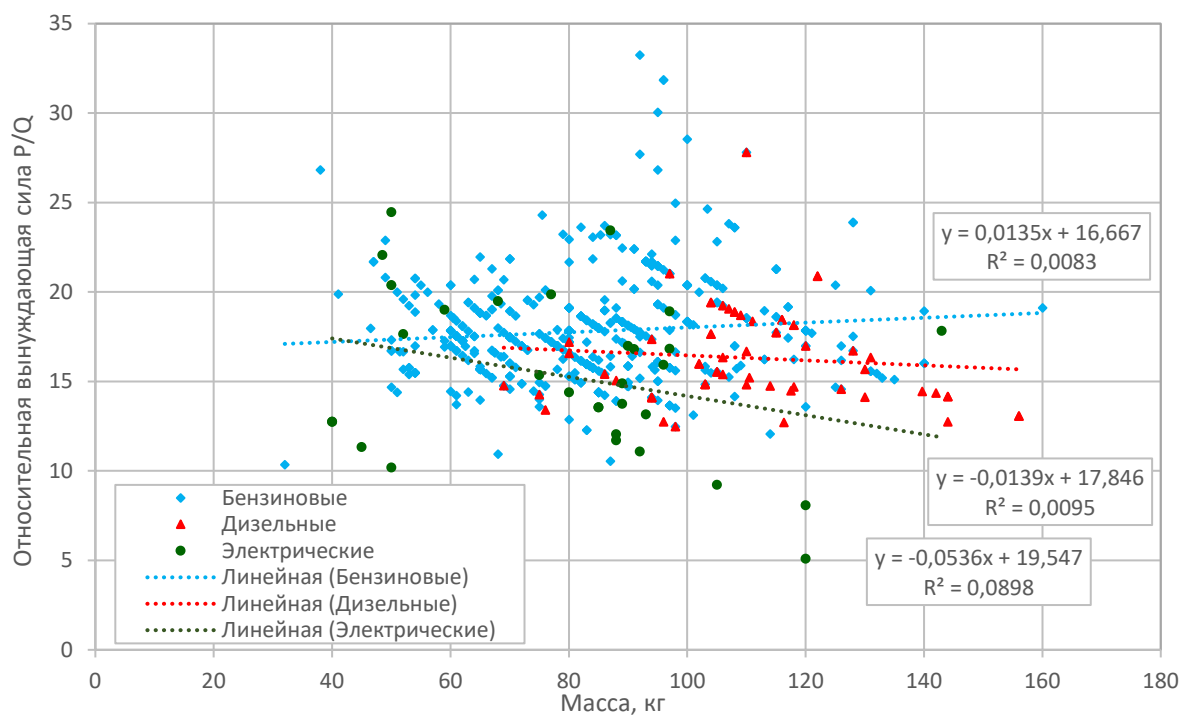


Рисунок 5 – Взаимосвязь массы (M , кг) и относительной вынуждающей силы нереверсивных виброплит
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Correlation between mass (M , kg) and relative exciting force of forward plate compactors
Source: compiled by the authors.

Диапазоны значений относительной вынуждающей силы бензиновых, дизельных и электрических нереверсивных виброплит практически совпадают (см. рисунок 5). Исключение составляют отдельные модели электрических виброплит Belle, Вибромаш, ЗУБР, Красный маяк и МИСОМ, которые имеют меньшее значение относительной вынуждающей силы, чем их аналоги той же массы.

Полученные уравнения регрессионных зависимостей относительной вынуждающей силы от массы виброплит характеризуются очень низким коэффициентом детерминации. Расположение моделей виброплит на гиперболических кривых обусловлено тем, что большинство производителей выбирают зна-

чения вынуждающей силы из ряда дискретных значений (см. рисунок 1).

Значения относительной вынуждающей силы нереверсивных виброплит существенно превышают критические значения этого параметра, установленные Н.Я. Хархутой³ (таблица 2). Отсюда следует, что все рассматриваемые виброплиты, вне зависимости от типа двигателя, в процессе уплотнения периодически отрываются от грунта. При этом кратность колебаний может превышать 2...4. Этот фактор существенно усложняет исследование динамики виброплит и его обязательно следует учитывать при разработке математической модели, описывающей работу данного типа машин.

Таблица 2
Критические значения относительной вынуждающей силы P/Q для различных частот колебаний вибровозбудителя⁴

Table 2
Critical values of relative exciting force P/Q for different oscillation frequencies of vibration exciter⁴

Параметр	Значение		
Частота колебаний f, Гц	12...25	25...50	50...85
Критическое значение P/Q	0,7...1	1...1,4	1,4...2,3

В таблице 3 представлены уравнения регрессии, связывающие основные характеристики нереверсивных виброплит с массой, а также соответствующие им значения коэффициента детерминации.

Таблица 3
Уравнения регрессии для нереверсивных виброплит
Источник: составлено авторами.

Table 3
Regression equations for forward plate compactors
Source: compiled by the authors.

Тип двигателя	Параметр	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации, R ²
Бензиновые	Вынуждающая сила (P, кН)	$P = 0,1384M^{1,0501}$	0,7268
	Частота колебаний (f, Гц)	$f = -0,0333M + 94,346$	0,0052
	Мощность двигателя (N, кВт)	$N = 0,4602M^{0,4752}$	0,2023
	Ширина основания (B, мм)	$B = 40,686M^{0,5319}$	0,6164
	Относительная вынуждающая сила (P/Q)	$P/Q = 0,0135M + 16,667$	0,0083

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

⁴ Там же.

Тип двигателя	Параметр	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации, R^2
Дизельные	Вынуждающая сила (P, кН)	$P = 0,2031M^{0,9466}$	0,5291
	Частота колебаний (f, Гц)	$f = -0,0357M + 96,531$	0,0135
	Мощность двигателя (N, кВт)	$N = 8,9191M^{-0,209}$	0,0822
	Ширина основания (B, мм)	$B = 106,52M^{0,3185}$	0,2933
	Относительная вынуждающая сила (P/Q)	$P/Q = -0,0139M + 17,846$	0,0095
Электрические	Вынуждающая сила (P, кН)	$P = 0,4746M^{0,7223}$	0,3683
	Частота колебаний (f, Гц)	$f = 0,1121M + 68,985$	0,0144
	Мощность двигателя (N, кВт)	$N = 0,002M^{1,4743}$	0,6687
	Ширина основания (B, мм)	$B = 124,35M^{0,2841}$	0,3322
	Относительная вынуждающая сила (P/Q)	$P/Q = -0,0536M + 19,547$	0,0898

ОБСУЖДЕНИЕ

В каждой из рассмотренных подгрупп нереверсивных виброплит (с бензиновыми, дизельными и электрическими двигателями) наблюдается очень большой (в 2 и более раза) разброс значений параметров. Косвенно это указывает на то, что у производителей отсутствуют методики обоснования технических характеристик нереверсивных виброплит. Причина этого, возможно, кроется в отсутствии методик оценки влияния технических характеристик виброплит на результат уплотнения грунта в различных условиях производства работ (с учетом типа и влажности грунта, толщины уплотняемого слоя и требуемого коэффициента уплотнения).

Диапазоны изменения значений вынуждающей силы, относительной вынуждающей силы и мощности для бензиновых и дизельных виброплит сопоставимой массы совпадают в диапазоне масс до 130 кг. При массе свыше 130 кг диапазоны значений вышеперечисленных параметров для дизельных виброплит располагаются несколько ниже, чем для бензиновых. Диапазоны значений частоты колебаний и ширины оснований совпадают во всем диапазоне масс.

Диапазон изменения значений вынуждающей силы электрических виброплит в целом совпадает с соответствующим диапазоном моделей с ДВС. При этом выделяются электрические модели виброплит, произведенные в РФ и Белоруссии, поскольку они имеют

сравнительно низкие значения вынуждающей силы.

Мощность электрических виброплит значительно ниже, чем у моделей сопоставимой массы с ДВС. При этом значения основных параметров электрических виброплит в значительной мере зависят от их конструкции.

Ряд полученных регрессионных зависимостей, обладающих крайне низким коэффициентом детерминации, имеют характер, не соответствующий известным представлениям о взаимосвязи технических характеристик вибрационных грунтоуплотняющих машин. Это относится к уравнениям регрессии мощности от массы для виброплит с дизельными двигателями, относительной вынуждающей силы от массы для бензиновых моделей, а также частоты колебаний от массы для электрических виброплит.

В ходе исследования не удалось получить регрессионные зависимости длины опорной поверхности от массы виброплиты. Это связано с тем, что большинство производителей приводят информацию только о габаритной длине основания, которая не имеет четкой связи с длиной опорной поверхности. Вместе с тем длина опорной поверхности необходима для определения площади контактной поверхности. Последний параметр большинством производителей также не указывается, однако он необходим для установления амплитудных значений контактных напряжений под виброплитой.

Существующие исследования [1, 21] предлагают использовать для вычисления амплитудных контактных напряжений под виброплитой формулу

$$\sigma_0 = k_{\text{пр}} \frac{P + Q}{F},$$

где P – вынуждающая сила, Н; Q – вес виброплиты, Н; F – площадь опорной поверхности, м²; $k_{\text{пр}}$ – коэффициент превышения.

Формула содержит коэффициент превышения, который получен опытным путем и зависит от относительной вынуждающей силы. Однако значения коэффициента превышения установлены только для значений относительной вынуждающей силы в диапазоне $P/Q = 2 \dots 12$. Как видно из рисунка 5, в современных неререверсивных виброплитах такие низкие показатели относительной вынуждающей силы почти не встречаются. Кроме того, данный коэффициент не учитывает разницу во взаимодействии неререверсивных и реверсивных виброплит с грунтом, обусловленных существенными различиями механизмов их передвижения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для дальнейшего анализа можно не разделять между собой неререверсивные виброплиты с бензиновым и дизельным двигателем. Диапазоны изменения технических характеристик электрических виброплит, в большинстве случаев, выходят за диапазоны изменения технических характеристик виброплит с двигателем внутреннего сгорания.

Низкий коэффициент детерминации и большой разброс значений параметров виброплит различных моделей сопоставимой массы свидетельствует об отсутствии у производителей методики обоснования технических характеристик неререверсивных виброплит. Анализ рекомендаций производителей по оценке технологических возможностей и назначению числа проходов виброплит при уплотнении грунтов в различных условиях производства работ [2, 25] показывает крайнюю ограниченность данных рекомендаций, которые не позволяют применять их для практических целей. Представляется, что оба этих фактора являются следствием отсутствия методики расчета влияния технических характеристик самоходных

неререверсивных виброплит на результат уплотнения грунта в различных условиях производства работ. Одним из факторов, обуславливающих трудность разработки такой методики, является ярко выраженный виброударный характер колебаний виброплит, связанный с тем, что относительная вынуждающая сила неререверсивных виброплит существенно (в 7...13 раз) превышает критические значения при соответствующих частотах колебаний, установленные профессором Н.Я. Хархутой⁵ (см. таблицу 2). Также эта особенность приводит к тому, что в процессе взаимодействия с грунтом виброплита периодически совершает отрыв от грунта, и до восстановления контакта с грунтом вибровозбудитель может совершать несколько оборотов. Это требует обязательного учета при построении математической модели взаимодействия виброплиты с грунтом.

Как показали результаты статистического анализа, невысокие значения коэффициентов детерминации зависимостей основных параметров виброплит от их массы не позволяют сформулировать рекомендации для производителей неререверсивных виброплит только на основании технических характеристик уже существующих моделей. Необходимо более глубокое исследование рабочего процесса взаимодействия неререверсивных виброплит с грунтом для выработки рекомендаций по обоснованию технических характеристик виброплит на стадии проектирования.

Тип двигателя влияет на соотношение массы основания и рамы (с двигателем) при релогическом моделировании неререверсивных виброплит с применением многомассных релогических моделей [15].

Продолжается тенденция увеличения частоты колебаний и относительной вынуждающей силы неререверсивных виброплит. Так, ко второй половине 1960-х годов значения частоты колебаний не превышали 65 Гц, а значение относительной вынуждающей силы $P/Q \leq 12 \dots 15$ [21]. К 2011 г. максимальная частота колебаний вибровозбудителя в неререверсивных виброплитах увеличилась до 100 Гц, а значения относительной вынуждающей силы до $P/Q \leq 20$ [1]. В современных моделях неререверсивных виброплит частота колебаний достигает 126 Гц, а относительная вынуждающая сила $P/Q \leq 33$. Это приводит к необходимости корректировки существующей зависимости

⁵ Хархута Н.Я., Васильев Ю.М. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1975. 288 с.

Н.Я. Хархуты для расчета значений амплитудных контактных напряжений под реверсивной виброплитой, которая, кроме использования неактуального в настоящее время диапазона значений P/Q , не учитывает частоту колебаний и характеристики уплотняемого грунта.

Полученные регрессионные зависимости позволяют учесть накопленный опыт разработки и эксплуатации виброплит при их проектировании, в частности, для обоснования мощности двигателя и ширины основания неревверсивных виброплит.

Представленные результаты целесообразно использовать для уточнения диапазонов изменения параметров и формулирования требований для математической модели работы виброплит и определения взаимосвязи их технических характеристик и технологических возможностей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кузьмичев В.А., Кузьмичев В.Д. Исследование рабочих параметров самоходных виброплит, применяемых при уплотнении грунтов // Вестник гражданских инженеров. 2011. № 3(28). С. 66–71. EDN OPHUNZ.
2. Тюремнов И.С., Новичихин А.А. Уплотнение грунтов вибрационными плитами: монография [Электронный ресурс]. Ярославль. Издат. дом ЯГТУ, 2018. 143 с. – 1 электрон. опт. диск.
3. 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.
4. Kaufmann, K. & Anderegg, Roland GPS-based Compaction Technology. Proceedings of the 1st International Conference on Machine Control and Guidance. 2008. 287–296.
5. 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. 393. 10.1016/j.conbuildmat.2023.132031.
6. 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. 10.3390/s23177507.
7. 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. 10.1007/s10706-023-02598-z.
8. Hassan, Asem & Nadhum, Gehan. Geotechnical-Electrical Evaluation of Soil Compaction Parameters, South of Baqubah City. Iraqi Geological Journal. 2023. 56. 144–155. 10.46717/igj.56.1D.12ms-2023-4-21.
9. Yao, Yangping & Song, Er Bo. Intelligent compaction methods and quality control. Smart Construction and Sustainable Cities. 2023. 1. 10.1007/s44268-023-00004-4.
10. Aodah, Haider & Chandra, Satish Intelligent Compaction Technology. 2018.
11. 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.
12. 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. 10.3390/s20154288.
13. 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. 10.1088/1361-6501/abd7ab.
14. 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. 10.1155/2021/4100896.
15. Кузьмичев В.Д. Математическая модель виброплиты // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 3(35). С. 65–68.
16. 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.
17. Sawant, Rohan. Advance Equipment for Compaction on Site. 2021. 10.35291/2454-9150.2021.0099.
18. Рябов Г.К., Леонтьева В.С., Федосеев Ю.В. О механизме передвижения бесколесной виброплиты // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2012. № 3(96). С. 143.
19. 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.
20. Кузьмичев В.Д. Разработка динамической модели самоходной неревверсивной виброплиты // Механика XXI века. 2012. № 11. С. 39–45.
21. Хархута Н.Я., Андрейченко Ю.Я. Выбор основных параметров виброплит. Строительные и дорожные машины. 1968. № 4. С. 6–8.
22. Мусияко Д.В., Расулов Р.А. Самоходная вибрационная плита с вальцем // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2016. № 4(43). С. 73–80.

23. Anderegg, Roland Automatische Verdichtungskontrolle: eine Anwendung der nichtlinearen Schwingungstheorie. 2018.

24. Тюремнов И.С., Новичихин А.А. Статистический анализ технических характеристик вибрационных плит // Механизация строительства. 2014. № 11(845). С. 32–35.

25. Тюремнов И.С., Новичихин А.А., Филатов И.С. Обзор рекомендаций производителей по использованию вибрационных плит для уплотнения грунта // Механизация строительства. 2014. № 12(846). С. 28–32.

REFERENCES

1. Kuz'michev V.A., Kuz'michev V.D. Research of working parameters of self-propelled vibroplates used at ground consolidation. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2011; 3(28): 66–71. (in Russ.)

2. Tyuremnov I.S., Novichikhin A.A. *Soil compaction by vibrating plates: monograph* [Electronic resource]. Yaroslavl. Izdat. dom YaSTU, 2018:143. – 1 elektron. opt. disk. (in Russ.)

3. 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.

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

5. 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. 10.1016/j.conbuildmat.2023.132031.

6. 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. 10.3390/s23177507.

7. 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. 10.1007/s10706-023-02598-z.

8. Hassan, Asem & Nadhum, Gehan. Geotechnical-Electrical Evaluation of Soil Compaction Parameters, South of Baqubah City. *Iraqi Geological Journal*. 2023. 56. 144–155. 10.46717/igj.56.1D.12ms-2023-4-21.

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

10. Aodah, Haider & Chandra, Satish Intelligent Compaction Technology. 2018.

11. 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.

12. 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. 10.3390/s20154288.

13. 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. 10.1088/1361-6501/abd7ab.

14. 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. 10.1155/2021/4100896.

15. Kuzmichev V.D. Mathematical model of a vibrating plate. *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2012; 3(35): 65–68. (in Russ.)

16. 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.

17. Sawant, Rohan Advance Equipment for Compaction on Site. 2021. 10.35291/2454-9150.2021.0099.

18. Ryabov G.K., Leontieva V.S., Fedoseev Yu.V. About the mechanism of wheelless vibratory plate movement. *Transactions of NNSTU N.A. R.E. Alekseev*. 2012; 3(96): 143. (in Russ.)

19. Bashkarev A.Ya., Musiyako D.V., Peshkov V.S. Vibrational movement of the surface compactor. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta*. 2013; 1(166): 175–178. (in Russ.)

20. Kuzmichev, V.D. Development of the dynamic model of the self-propelled non-reversible vibratory plate. *Mehaniki XXI veku*. 2012; 11: 39–45. (in Russ.)

21. Kharkhuta N.Ya., Andreichenko Yu.Ya. Selecting the main parameters of a vibrating plate. *Construction and road machinery*. 1968; 4: 6–8. (in Russ.)

22. Musiyako D.V., Rasulov R.A. Self-propelled vibrating plate with a roller. *Bulletin of PNU*. 2016; 4(43): 73–80. (in Russ.)

23. Anderegg, Roland *Automatische Verdichtungskontrolle: eine Anwendung der nichtlinearen Schwingungstheorie*. 2018.

24. Tyuremnov I.S., Novichikhin A.A. Statistical analysis of technical characteristics of vibrating plates. *Mehanizacija stroitel'stva*. 2014; 11(845): 32–35. (in Russ.)

25. Tyuremnov, I.S., Novichikhin, A.A., Filatov I.S. Review of manufacturers' recommendations on the use of vibrating plates for soil compaction. *Mehanizacija stroitel'stva*. 2014; 12(846): 28. (in Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

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

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

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Afanasev M.A. Data on the technical specifications of plate vibrators collection, data processing, article preparation.

Tyuremnov I.S. General research management, article preparation.

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

Mikhail A. Afanasev. Postgraduate student of the Construction and Road Machines Department, Yaroslavl State Technical University (88, Moskovskii Proezd, Yaroslavl, 150023), **ORCID:** 0009-0005-5095-2557, **SPIN-code:** 8256-8500, e-mail: afanasiev.m.a2016@yandex.ru.

Ivan S. Tyuremnov. Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Construction and Road Machines Department, (88, Moskovsky Prospekt, Yaroslavl, 150023), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2261-4153>, **SPIN-код:** 9976-0728, e-mail: tyuremnovis@yandex.ru