

Научная статья
УДК 624.138.22
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-728-749>
EDN: GDECFC



СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОВЫХ ВИБРАЦИОННЫХ КАТКОВ РАЗЛИЧНЫХ ПОКОЛЕНИЙ

И.С. Тюремнов ✉, Д.А. Шорохов

Ярославский государственный технический университет (ЯГТУ),
г. Ярославль, Россия

✉ ответственный автор
tyuremnovis@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Грунтовые вибрационные катки являются наиболее распространенным типом спецтехники для уплотнения грунтов благодаря своей универсальности и высокой производительности. На эффективность уплотнения грунтов вибрационными катками оказывают влияние большое количество параметров, которые оценивают статические (общая масса и распределение массы между тяговым и уплотняющим модулем), динамические (частота и вынуждающая сила колебаний) и общие (мощность двигателя, транспортная и рабочая скорости движения, диаметр и ширина вальца) характеристики. Статистическая обработка технических характеристик является эффективным инструментом для изучения взаимосвязи между параметрами и выявления тенденций развития, в том числе для грунтовых вибрационных катков различных поколений.

Материалы и методы. В исследовании анализировались технические характеристики грунтовых вибрационных катков различных поколений. Статистическая обработка проводилась в программе Microsoft Excel. Общее количество рассмотренных грунтовых вибрационных катков составило 432 модели, из них 252 машины 3-го и 4-го поколений и 180 машин 5-го поколения.

Результаты. Показаны графические представления взаимосвязей различных технических характеристик грунтовых вибрационных катков разных поколений в зависимости от массы вибровальцового модуля. Также получены уравнения регрессии и соответствующие значения коэффициентов детерминации. Предложен параметр «линейная относительная вынуждающая сила», характеризующий совместное влияние относительной вынуждающей силы и ширины вальца грунтового катка.

Обсуждение и заключение. В результате исследования определены диапазоны изменения основных технических характеристик вибрационных катков различных поколений, выпускавшихся в течение последних 20...30 лет, и выявлены некоторые тенденции изменения этих параметров при переходе к различным поколениям грунтовых катков. Сравнительно большой разброс значений технических характеристик, отвечающих за динамические возможности грунтовых вибрационных катков, свидетельствует об отсутствии у производителей и исследователей единого мнения по обоснованию численных значений данных параметров.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: грунт, уплотнение, каток вибрационный, технические характеристики, масса, вынуждающая сила, частота колебаний, анализ статистический

БЛАГОДАРНОСТИ: авторы выражают благодарность редактору и рецензентам данной статьи.

Статья поступила в редакцию 12.11.2024; одобрена после рецензирования 03.03.2025; принята к публикации 21.10.2025.

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: Тюремнов И.С., Шорохов Д.А. Статистический анализ технических характеристик грунтовых вибрационных катков различных поколений // Вестник СиБАДИ. 2025. Т. 22, №5 С. 728-749. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-728-749>

© Тюремнов И.С., Шорохов Д.А., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-728-749>

EDN: GDECFC

STATISTICAL ANALYSIS OF TECHNICAL CHARACTERISTICS OF SOIL VIBRATORY ROLLERS OF DIFFERENT GENERATIONS

Ivan S. Tyuremnov ✉, Dmitry A. Shorohov

Yaroslavl State Technical University,

Yaroslavl, Russia

✉ corresponding author
tyuremnovis@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. Soil vibratory rollers are the most prevalent type of specialized machinery for soil compaction, owing to their versatility and high productivity. The effectiveness of soil compaction using vibratory rollers is influenced by a multitude of parameters, categorized into static characteristics (total mass and mass distribution between the traction and compaction modules), dynamic characteristics (vibration frequency and excitation force), and general characteristics (engine power, transport and operating travel speeds, drum diameter and width). Statistical analysis of technical specifications serves as an effective tool for investigating the interrelationships among these parameters and identifying developmental trends, including those observed in soil vibratory rollers across different generations.

Materials and methods. The study analyzes the technical characteristics of soil vibratory rollers of different generations. Statistical processing was carried out using Microsoft Excel software. 432 models of vibratory rollers, including 252 vibratory rollers of 3rd and 4th generation and 180 vibratory rollers of 5th generation, were scrutinized.

Results. Graphs of various technical characteristics of soil vibratory rollers of different generations vs mass of the vibratory drum modules were plotted. Regression equations and corresponding determination coefficients were derived. The parameter “linear relative excitation force” has been proposed to characterize the combined influence of the relative excitation force and the drum width of a soil vibratory roller.

Discussion and conclusion. The study presents the changes of the main technical characteristics of vibratory rollers of different generations produced over the past 20-30 years as well as certain trends in these changes during the transition between generations of soil rollers. The relatively large variation in the technical characteristics responsible for dynamic capabilities of soil vibratory rollers indicates a lack of consensus among manufacturers and researchers regarding the numerical values of these parameters.

KEYWORDS: soil, compaction, vibratory roller, technical characteristics, mass, compaction force, frequency of oscillations, statistical analysis

ACKNOWLEDGEMENTS: the authors express their gratitude to the editor and reviewers of this article.

The article was submitted 12.11.2024; approved after reviewing 03.03.2025; accepted for publication 21.10.2025.

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. Tyuremnov I.S., Shorohov D.A. Statistical analysis of technical characteristics of soil vibratory rollers of different generations. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (5): 728-749. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-728-749>

© Tyuremnov Ivan S., Shorohov Dmitrii A., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

Уплотнение грунтов осуществляется для увеличения их несущей способности и устойчивости к воздействию погодно-климатических факторов. Грунтовые вибрационные катки используются для уплотнения различных дорожно-строительных материалов при строительстве дорог, взлетно-посадочных полос, в промышленном, гражданском, гидротехническом строительстве и др. Грунтовые катки могут уплотнять грунты статической и вибрационной составляющей воздействия^{1,2,3,4}.

Катки статического действия уплотняют грунт только за счёт своей собственной массы. Гладковальцовые статические катки в настоящее время для уплотнения грунтов практически не применяются. В то же время статические пневмоколесные катки (преимущественно, прицепные) продолжают использоваться.

Вибрационные грунтовые катки получили наибольшее распространение за счёт более высокой уплотняющей способности, особенно при работе на несвязных грунтах^{4,5,6} [1].

Основные технические характеристики грунтовых вибрационных катков, определяющие их технологические возможности, можно разделить на статические, динамические и общие.

К характеристикам, определяющим статическое воздействие, можно отнести общую массу машины, а также распределение массы между вибрационным и тяговым модулем.

На динамическое воздействие влияет частота колебаний и вынуждающая сила вибро-возбудителя.

Диаметр вальца влияет^{7,8} на размеры площади контакта вальца с грунтом и глубину уплотнения значения амплитудных контактных напряжений при статическом и динамическом режиме воздействия, а также на проходимость машины.

На преодоление продольных уклонов, устойчивость к опрокидыванию и производительность катка влияют: мощность двигателя, транспортная и рабочая скорости движения, размеры вальца (ширина и диаметр).

Таким образом, на функциональные возможности, такие как проходимость, управляемость и производительность вибрационных грунтовых катков оказывает влияние большое количество различных факторов со сложным характером взаимосвязей⁹.

Эффективное уплотнение грунтов достигается за счёт правильного подбора массы катка, вынуждающей силы, частоты колебаний и рабочей скорости катка на каждом проходе с учетом вида уплотняемого грунта, толщины слоя, требуемого коэффициента уплотнения и влажности уплотняемого грунта [2, 3, 4].

В настоящее время на рынке представлен широкий спектр моделей катков различных производителей и поколений. Вопрос отнесения катков к тому или иному поколению не до конца проработан. Информация о существовании различных поколений вибрационных катков получена из материалов производителей. Однако не удалось обнаружить критерии отнесения катков к тому или иному поколению, за исключением годов выпуска, при том

¹ Хархута Н.Я., Васильев Ю.М. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог. М: Транспорт, 1975. 285 с.

² Костельов М.П. Возможность и эффективность уплотнения виброкатками грунтов различного типа и состояния // Дорожная техника. Каталог-справочник. 2004. С. 72–82.

³ Костельов М.П. «Умные виброкатки» для дорожников (обзор с оценкой новинок последнего времени) // Каталог-справочник «Дорожная техника». 2006. С. 30–32.

⁴ Костельов М.П. Опять о качестве и эффективности уплотнения различных грунтов современными виброкатками // Дорожная техника. Каталог-справочник. 2008. С. 40–47.

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

⁶ Уплотняющие машины. Пособие по выбору оборудования для уплотнения грунтов и асфальтобетонных смесей (на примере машин, выпускаемых ЗАО «РАСКАТ», г. Рыбинск / В.П. Ложечко, А.А. Шестопапов, В.И. Окунев, Р.Д. Окулов, Рыбинск: Рыбинский дом печати, 2004. 79 с.

⁷ Хархута Н.Я., Васильев Ю.М. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог. М: Транспорт, 1975. 285 с.

⁸ Хархута Н.Я. Машины для уплотнения грунтов. Л.: Машиностроение, 1973. 176 с.

⁹ Тюремнов И.С. Обоснование подходов для разработки методики прогнозирования технологических возможностей мобильных грунтоуплотняющих машин виброударного действия // Интерстроймех–2021 [Электронный ресурс]: сборник докладов XXV Международной научно-технической конференции (г. Москва, 5–7 октября 2021 г.). М.: Издательство МИСИ – МГСУ, 2021. С. 94–102. Режим доступа: <https://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/46043/> (дата обращения: 16.04.2024)

что у некоторых производителей, например, DYNAPAC, для катков различных поколений применяют различную цветовую схему окраски^{10, 11}.

Предполагается, что грунтовые катки 3-го поколения в основном характеризовались наличием 1...2 режимов колебаний, которые реализовывались преимущественно за счет регулирования частоты вращения вибровозбудителя и угла разведения (статического момента) дебалансов при изменении направления вращения вала. Отличительной чертой катков 4-го поколения является возможность реализации от 2 до 5 режимов колебаний. Постепенно внедрялись бортовые системы автоматизированного управления подсистемами катка, регистрации параметров, контроля качества уплотнения^{12,13,14} [5,6]. Особое внимание в 4-м поколении катков уделяется эргономике рабочего места оператора и обеспечению экологических норм^{15, 16,17}. Поскольку дискуссия о критериях отнесения катков к 3-му или 4-му поколению не завершена, в статье катки данных поколений рассматриваются совместно. Принадлежность катков к 5-му поколению указывается самими производителями, поэтому они рассматриваются отдельно.

Ведущие производители грунтовых вибрационных катков, начиная с 2020 г., перешли к выпуску машин 5-го поколения. Данные катки продолжают тенденцию прошлых поколений по улучшению эргономических и экологиче-

ских показателей, внедрению систем автоматизации, мониторинга параметров катков и результатов уплотнения. Стоит отметить, что производители уделяют много внимания не только эргономике рабочего места и комфорту оператора, но и внешнему виду спецтехники. Все вышеперечисленные усовершенствования привели к значительному повышению эффективности уплотнения и производительности современных вибрационных катков. Ведущие производители грунтовых вибрационных катков продолжают все также активно инвестировать в исследования взаимодействия катка с уплотняемым материалом и прочие разработки, ориентируясь на следующие направления:

- расширение функциональных возможностей¹⁴;
- оптимизация характеристик вибрационных катков (сочетания массы и её распределения по осям с частотой и вынуждающей силой колебаний, размеров вальца и мощности двигателя) для повышения их уплотняющей способности;
- совершенствование конструкций вибровозбудителей, расширение возможностей по регулированию характера, частоты и вынуждающей силы колебаний¹⁸ [7, 8];
- дальнейшее повышение эффективности уплотнения, в т.ч. за счёт автоматизации управления режимами уплотнения, внедрения систем непрерывного контроля уплотнения

¹⁰ Уплотнение и укладка. Теория и практика (издание Dynapac Compaction Equipment AB), «Рекламное агентство А.М.Г.», 2008, 90 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://goo.su/H3R9I> (дата обращения: 20.04.2024).

¹¹ Грунтовые катки Dynapac [Электронный ресурс]. URL: <https://dynapac.com/ru/products/compaction?tab=products> (дата обращения: 20.04.2024).

¹² Mooney M. et al. Intelligent Soil Compaction Systems. NCHRP Report 676. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2010. 178.

¹³ Mooney M., Adam D. Vibratory Roller Integrated Measurement of Earthwork Compaction: An Overview // FMGM 2007 Seventh Int. Symp. F. Meas. Geomech. Boston, Massachusetts, Sept. 24-27. 2007. 1–12.

¹⁴ Тюремов И.С. Современное состояние и конструктивные особенности вибрационных катков // Мир дорог. 2009. № 42.С. 64–69.

¹⁵ Грунтовые катки «РАСКАТ» [Электронный ресурс]. URL: <https://oao-raskat.ru/wp-content/uploads/Gruntovue-RV.pdf> (дата обращения: 20.04.2024).

¹⁶ Amman тяжёлая уплотнительная техника. Линейка грунтовых катков. [Электронный ресурс]. URL: <http://sdmmachinery.ru/assets/images/pdf> (дата обращения: 20.04.2024).

¹⁷ Машины для дорожного строительства CAT. Руководство по уплотнению грунта. QRBQ 1705 Caterpillar., 2013. 132 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/CM20200908-95d72-75196> (дата обращения: 20.04.2024).

¹⁸ Михеев В.В. Об энергоэффективных конструкциях дорожных катков и технологиях уплотнения грунтовых сред в дорожном строительстве // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: сборник материалов V Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию ФГБОУ ВО «СибАДИ», Омск, 3–4 декабря 2020 года. Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2021. С. 30–37.

([9, 10] и др.), машинного обучения ([11, 12] и др.);

- повышение комфорта оператора, снижение уровня шума, энергопотребления и выбросов;

- разработка «интеллектуальных» катков, способных в автоматическом режиме регулировать режимы вибрации и скорость движения с учетом изменяющихся свойств грунта для обеспечения максимальной эффективности и качества уплотнения ¹² [13, 14, 15];

- повышение надежности катков, снижение трудоемкости обслуживания¹⁹.

Трудности, связанные с исследованием физико-механических свойств различных грунтов и процессов, происходящих при уплотнении грунта вибрационными катками, привели к тому, что научные сообщества и производители данной спецтехники не имеют общепринятого представления о технических параметрах машин [16, 17].

Поэтому, несмотря на большой опыт исследований и применения вибрационных грунтовых катков, большое количество влияющих факторов, многообразие и недостаточная изученность свойств уплотняемых грунтов не позволяют определить рациональные соотношения между различными характеристиками вибрационных грунтовых катков. Вследствие чего производители продолжают опытным путем определять параметры машин, эффективные для различных условий производства работ, что выражается в изменении технических характеристик выпускаемых вибрационных катков по мере появления нового опыта исследований и применения катков.

Цель данного исследования заключается в выявлении закономерностей развития и тенденций изменения основных параметров грунтовых вибрационных катков 3...5-го поколений путем анализа и сравнительной оценки их технических характеристик.

Данное исследование представляет научную новизну с точки зрения обобщения информации о технических характеристиках грунтовых вибрационных катков, выпускавшихся с конца 1990-х годов и по настоящее время, и выделения некоторых тенденций развития данной спецтехники в течение последних 20...25 лет.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для анализа технических характеристик грунтовых вибрационных катков использовались модели различных отечественных и зарубежных производителей: АМКОДОР, ЗАВОД ДОРОЖНЫХ МАШИН, РАСКАТ, АММАНН, АТЛАС WEYCOR, BOMAG, CATERPILLAR, DYNAPAC, HAMM, HYUNDAI, JCB, VOLVO, MITSUBER, GUANGXI LIUGONG MACHINERY, SHANDONG CHANGLIN, SAKAI, SHANDONG CHANGLIN, XCMG, YTO INTERNATIONAL, XIAMEN XGMA, ZOOMLION, SEM, SDLG, SHANTUI, LINGONG, CASE. Общее количество моделей грунтовых вибрационных катков составило 432, в том числе 252 модели катков 3-го и 4-го поколений и 180 моделей катков 5-го поколения. Обработка результатов выполнялась в программе Microsoft Excel: строились графические распределения характеристик вибрационных грунтовых катков различных поколений, по которым получались уравнения регрессии и коэффициенты детерминации с использованием инструмента «Линия тренда».

В качестве основных технических характеристик вибрационных катков, определяющих их уплотняющую способность и производительность, рассматривались: M – эксплуатационная масса вибрационного катка, кг; M_b – масса, приходящаяся на вибровальцовый модуль, кг; N – мощность двигателя, кВт; f – частота колебаний (f_1 – для режима «максимальная вибрация», т.е. максимальной вынуждающей силы, f_2 – для режима «минимальная вибрация», т.е. минимальной вынуждающей силы), Гц; P – вынуждающая сила (P_1 – для режима «максимальная вибрация», P_2 – для режима «минимальная вибрация»), кН; $q_{\text{лн}}$ – линейная статическая нагрузка, кг/см; B – ширина вальца, мм; D – диаметр вальца, мм.

Кроме абсолютного значения вынуждающей силы (центробежной силы вибровозбудителя) P , необходимо рассматривать относительную вынуждающую силу, которая определяется отношением вынуждающей силы вибровозбудителя P к весу машины P/Q или к весу, приходящемуся на вибрационный модуль катка P/Q_b (для режимов максимальной вибрации и минимальной вибрации, соответственно, P_1/Q_b и P_2/Q_b).

¹⁹ Берман А.Ю., Воскресенский Г.Г. Современные тенденции развития вибрационных катков // Фундаментальная и прикладная наука: состояние и тенденция развития: сборник статей III Международной научно-практической конференции, Петрозаводск, 5 марта 2020 года. Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука» (ИП Ивановская Ирина Игоревна), 2020. С. 75–81.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные результаты статистической обработки технических характеристик грунтовых вибрационных катков различных поколений сведены в общую таблицу (таблица 1).

Анализ полученных данных (см. таблицу 1)

показывает наличие достаточно тесной взаимосвязи между массой вибровальцового модуля $M_{\text{в}}$ и эксплуатационной массой катка M (рисунок 1), а также между массой вибровальцового модуля $M_{\text{в}}$ и мощностью двигателя N (рисунок 2).

Таблица 1
Результаты статистической обработки технических характеристик грунтовых
вибрационных катков различных поколений
Источник: составлено авторами.

Table 1
Results of the statistical analysis of technical characteristics of soil vibratory rollers of various generations
Source: compiled by the authors.

Функция	Поколение	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации R^2
$M = f(M_{\text{в}})$	3-е и 4-е	$M_{\text{в}} = 0,132 M^{1,154}$	0,912
	5-е	$M_{\text{в}} = 0,183 M^{1,121}$	0,912
	Сводный	$M_{\text{в}} = 0,164 M^{1,132}$	0,911
$N = f(M_{\text{в}})$	3-е и 4-е	$N = 0,485 M_{\text{в}}^{0,601}$	0,786
	5-е	$N = 0,431 M_{\text{в}}^{0,615}$	0,808
	Сводный	$N = 0,453 M_{\text{в}}^{0,610}$	0,801
$D = f(M_{\text{в}})$	3-е и 4-е	$D = 329,38 \ln(M_{\text{в}}) - 1462,5$	0,767
	5-е	$D = 266,83 \ln(M_{\text{в}}) - 889,11$	0,641
	Сводный	$D = 308,4 \ln(M_{\text{в}}) - 1270,4$	0,723
$B = f(M_{\text{в}})$	3-е и 4-е	$B = 454,34 \ln(M_{\text{в}}) - 2012,5$	0,714
	5-е	$B = 315,45 \ln(M_{\text{в}}) - 779,31$	0,623
	Сводный	$B = 399,36 \ln(M_{\text{в}}) - 1528,6$	0,674
$f_1 = f(M_{\text{в}})$	3-е и 4-е	$f_1 = 72,635 M_{\text{в}}^{-0,101}$	0,251
	5-е	$f_1 = 72,515 M_{\text{в}}^{-0,101}$	0,362
	Сводный	$f_1 = 72,494 M_{\text{в}}^{-0,101}$	0,290
$f_2 = f(M_{\text{в}})$	3-е и 4-е	$f_2 = 72,635 M_{\text{в}}^{-0,101}$	0,251
	5-е	$f_2 = 76,588 M_{\text{в}}^{-0,094}$	0,319
	Сводный	$f_2 = 78,268 M_{\text{в}}^{-0,094}$	0,238
$P_1 = f(M_{\text{в}})$	3-е и 4-е	$P_1 = 156,98 \ln(M_{\text{в}}) - 1134$	0,751
	5-е	$P_1 = 155,51 \ln(M_{\text{в}}) - 1110,1$	0,808
	Сводный	$P_1 = 156,47 \ln(M_{\text{в}}) - 1125,4$	0,776
$P_2 = f(M_{\text{в}})$	3-е и 4-е	$P_2 = 0,296 M_{\text{в}}^{0,714}$	0,607
	5-е	$P_2 = 0,128 M_{\text{в}}^{0,805}$	0,556
	Сводный	$P_2 = 0,217 M_{\text{в}}^{0,748}$	0,588
$P_1/Q_{\text{в}} = f(M_{\text{в}})$	3-е и 4-е	$P_1/Q_{\text{в}} = -0,656 \ln(M_{\text{в}}) + 9,287$	0,194
	5-е	$P_1/Q_{\text{в}} = -1,01 \ln(M_{\text{в}}) + 12,574$	0,454
	Сводный	$P_1/Q_{\text{в}} = -0,784 \ln(M_{\text{в}}) + 10,476$	0,282
$P_2/Q_{\text{в}} = f(M_{\text{в}})$	3-е и 4-е	$P_2/Q_{\text{в}} = -0,658 \ln(M_{\text{в}}) + 8,309$	0,238
	5-е	$P_2/Q_{\text{в}} = -0,424 \ln(M_{\text{в}}) + 6,174$	0,102
	Сводный	$P_2/Q_{\text{в}} = -0,568 \ln(M_{\text{в}}) + 7,49$	0,182
$q_{\text{лсн}} = f(M_{\text{в}})$	3-е и 4-е	$q_{\text{лсн}} = 0,0042 M_{\text{в}} + 4,064$	0,961
	5-е	$q_{\text{лсн}} = 0,0043 M_{\text{в}} + 4,962$	0,927
	Сводный	$q_{\text{лсн}} = 0,0044 M_{\text{в}} + 4,173$	0,925
$(P_1/Q_{\text{в}})/B = f(M_{\text{в}})$	3-е и 4-е	$(P_1/Q_{\text{в}})/B = 98,114 (M_{\text{в}})^{-0,458}$	0,648
	5-е	$(P_1/Q_{\text{в}})/B = 125,44 (M_{\text{в}})^{-0,481}$	0,818
	Сводный	$(P_1/Q_{\text{в}})/B = 103,45 (M_{\text{в}})^{-0,462}$	0,706
$(P_2/Q_{\text{в}})/B = f(M_{\text{в}})$	3-е и 4-е	$(P_2/Q_{\text{в}})/B = 120,68 (M_{\text{в}})^{-0,521}$	0,626
	5-е	$(P_2/Q_{\text{в}})/B = 31,53 (M_{\text{в}})^{-0,374}$	0,411
	Сводный	$(P_2/Q_{\text{в}})/B = 72,482 (M_{\text{в}})^{-0,464}$	0,552
Синий цвет – грунтовые катки 3-го и 4-го поколения; красный цвет – грунтовые катки 5-го поколения; зелёный цвет – сводная зависимость по всем поколениям			

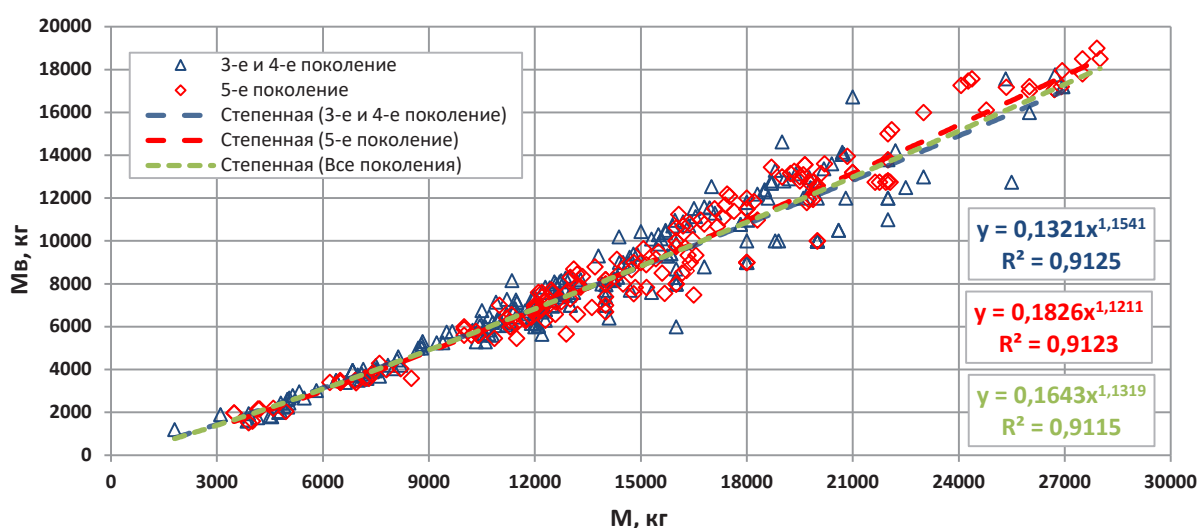


Рисунок 1 – Графическое представление взаимосвязи массы вибровальцового модуля M_v и эксплуатационной массы катка M
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Graphical representation of the relationship between the mass of the vibratory drum module M_v and the operational mass of the roller M
Source: compiled by the authors.

При сравнении различных поколений грунтовых вибрационных катков наблюдается тенденция увеличения массы (смещение диапазона массы вправо) для машин 5-го поколения (см. рисунок 1).

Для грунтовых вибрационных катков ключевым фактором является обеспечение тяговых свойств в процессе уплотнения. Чаще всего рабочим органом катка является гладкий валец, имеющий низкий коэффициент сцепления с уплотняемым грунтом^{20,21}. При движении катка в подъем сцепная сила тяги $T_{сц}$, формируемая вальцом, будет определяться произведением нормальной к поверхности уплотняемого материала реакции N на коэффициент сцепления $\varphi_{сц}$ ($T_{сц} = \varphi_{сц} \cdot N$). Поскольку при движении в подъем нормальная реакция N рассчитывается как вес, приходящийся на вибрационный модуль Q_v , умноженный на

косинус угла подъема α ($N = Q_v \cdot \cos \alpha$), то сила тяги, формируемая вальцом также будет уменьшаться:

$$T_{сц} = \varphi_{сц} \cdot Q_v \cdot \cos \alpha < \varphi_{сц} \cdot Q_v.$$

Как следствие, снижается тяговое усилие на вальце. К тому же в процессе уплотнения грунта с вибрацией, когда вынуждающая сила превышает вес вибровальцового модуля, может происходить периодический отрыв вибровальца от поверхности грунта^{22,23} [18, 19, 20]. В результате разгона вращения вальца гидромотором привода хода в процессе отрыва вальца от грунта, при восстановлении контакта вальца с грунтом вибровалец может начать проскальзывать. Поэтому для обеспечения движения машины в гору, в том числе с преодолением дополнительного продольного

²⁰ Характеристики катка: виды и назначение. Журнал: спецтехника [Электронный ресурс]. URL: <https://centr-teh.ru/blog/spectehnika/harakteristiki-katka> (дата обращения: 02.05.2024).

²¹ Определение параметров и режимов уплотнения дорожных катков: учеб. пособие / Г.В. Кустарев [и др.]; под общ. ред. Г.В. Кустарева. М.: МАДИ, 2022. 142 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://lib.madi.ru/fel/fel1/fel22E610.pdf> (дата обращения: 02.05.2024).

²² Adam D., Pistol J. Dynamic roller compaction for earthworks and roller-integrated continuous compaction control: State of the art overview and recent developments // Conf. di Geotec. di Torino, XXIV Ciclo. 2016. С 1–41.

²³ Erdmann P., Adam D. Numerical Simulation of Dynamic Soil Compaction with Vibratory Compaction Equipment // XV Danube - Eur. Conf. Geotech. Eng. 2014. № 119. 243–248.

уклона, возникающего в процессе уплотнения грунта и образования «волны» перед вальцом, необходимо правильно распределять вес машины по осям между тяговым (тракторным) и вибровальцовым (уплотняющим) модулем. Исходя из полученных данных (см. рисунок 1) для легких и средних катков (общей массой M менее 9000...15000 кг) на заднюю ось (тяговый модуль) приходится приблизительно 45% массы, тогда как на переднюю ось (вибровальцовый модуль) – около 55% массы. Для тяжелых катков (общей массой $M = 15000...21000$ кг) на заднюю ось (тяговый модуль) приходится около 40% массы, а на переднюю ось (вибровальцовый модуль) – около 60%. Масса тягового модуля сверхтяжелых катков (общей массой $M > 21000$ кг) составляет около 35%, а масса вибровальцового модуля – около 65% общей массы вибрационного катка. Предположительно это связано с тем, что главная функция катка – уплотнение грунта. Именно для повышения эффективности уплотнения служит увеличение массы машины и её уплотняющего (вибровальцового) модуля. С другой стороны, использование в составе катка унифицированных узлов и агрегатов (гидрооборудования, кабины, мостов, двигателя и т.д.) приводит к тому, что с увеличением общей массы машины масса, например, кабины или двигателя возрастет незначительно, что позволяет в большей степени увеличить массу

вибровальцового модуля при условии обеспечения проходимости машины, определяемой массой тягового модуля. Современные двигатели устроены таким образом, что на одном и том же двигателе можно увеличить мощность за счет некоторых конструктивных изменений и изменения алгоритмов управления рабочими процессами силового агрегата.

Хорошая взаимосвязь между массой вибровальцового модуля M_v и эксплуатационной массой катка M (см. рисунок 1) может объясняться ещё и тем, что практически все производители в процессе многолетнего опыта производства грунтовых вибрационных катков подобрали рациональные соотношения масс, приходящихся на вибровальцовый и тяговый модуль катка. Вероятно, производители исходили из принципа максимального увеличения массы вибровальцового модуля при сохранении тягово-сцепных свойств машины (в том числе при работе на крутых уклонах).

Линии регрессии $M_v(M)$ для вибрационных катков различных поколений практически совпадают, что свидетельствует о существовании единого для всех производителей мнения по данному вопросу. Причем у катков 5-го поколения наблюдается некоторое уменьшение разброса значений M_v для катков сопоставимой массы M , что также свидетельствует о том, что по данному вопросу у производителей разногласия практически отсутствуют.

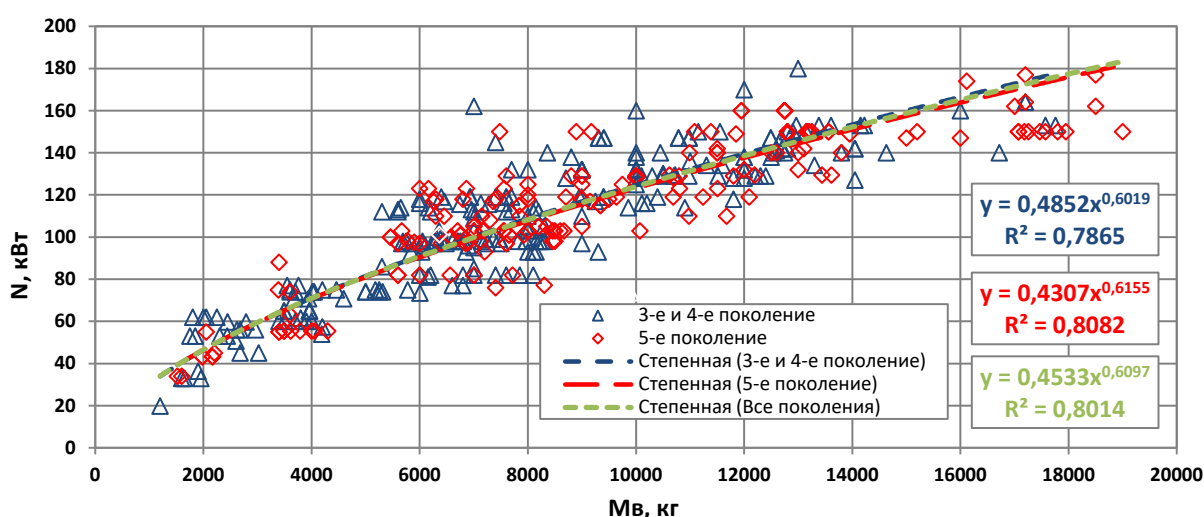


Рисунок 2 – Графическое представление взаимосвязи мощности двигателя N и массы вибровальцового модуля M_v
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Graphical representation of the relationship between engine power N and the mass of the M_v vibratory drum module
Source: compiled by the authors.

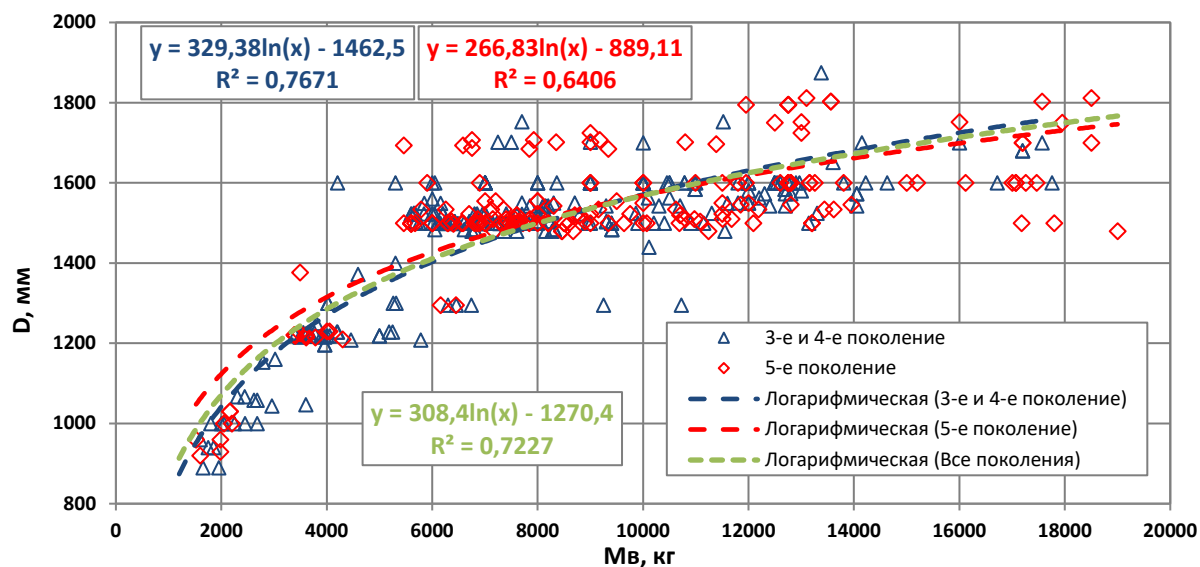


Рисунок 3 – Графическое представление взаимосвязи диаметра вальца D и массы вибрационного модуля M_v .
 Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Graphical representation of the relationship between the diameter of the roller D and the mass of the vibration module M_v .
 Source: compiled by the authors.

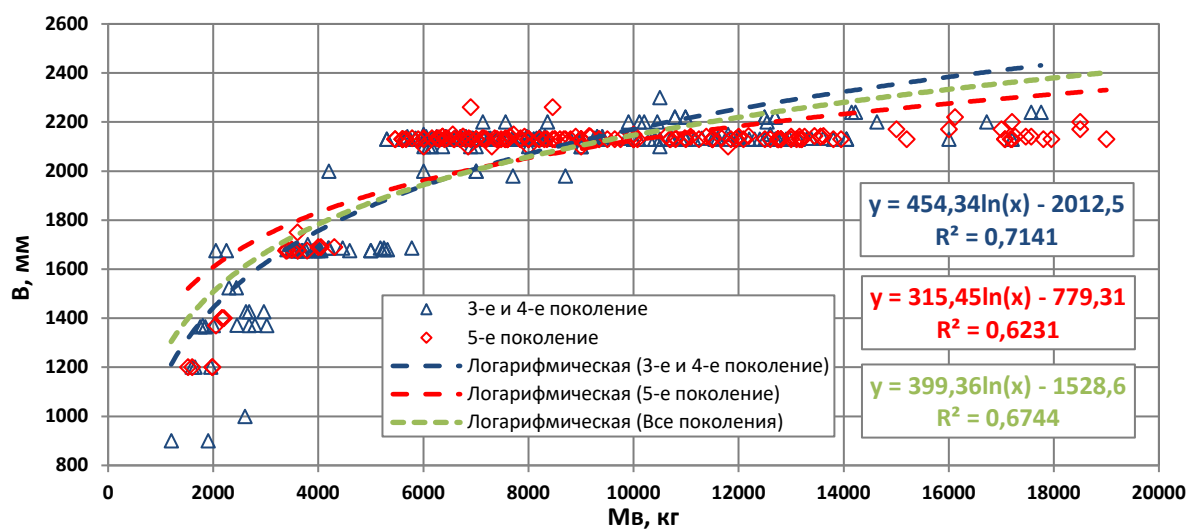


Рисунок 4 – Графическое представление взаимосвязи ширины вальца B и массы вибрационного модуля M_v .
 Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Graphical representation of the relationship between the width of the roller B and the mass of the vibration module M_v .
 Source: compiled by the authors.

При увеличении массы катка M (массы вибровальцового модуля M_v) мощность двигателя N растёт медленнее. Данная особенность может быть связана с тем, что с увеличением массы машины затраты мощности на работу подсистем катка (кондиционирование воздуха, освещение, работу электрооборудования и т.д.) остаются практически постоянными. Поэтому мощность двигателя используется более эффективно, что выражается в выполаживании кривой мощности двигателя от массы катка M или его вибровальцового модуля M_v (см. рисунок 2). При этом наблюдается незначительное снижение мощности двигателя для вибрационных катков 5-го поколения, по сравнению с мощностью двигателя катков 3...4-го поколений сопоставимой массы.

Независимо от поколения катков практически не изменяются взаимосвязи между размерами вальца (шириной B и диаметром D) и массой вибровальцового модуля M_v (рисунки 3 и 4).

Обращает внимание то, что на графиках (см. рисунки 3 и 4) характер изменения не монотонный, а ступенчатый. Для диапазона масс вибрационного модуля $M_v = 0...3000$ кг диаметр вальца составляет $D = 900...1000$ мм, а ширина $B = 1200...1400$ мм. Для $M_v = 3000...5000$ кг, диаметр вальца $D = 1200...1400$ мм, а ширина $B = 1650...1750$ мм. При $M_v > 5000$ кг, диаметр вальца находится в диапазоне $D = 1500...1800$ мм, а ширина $B = 2000...2260$ мм. Это согласуется с существующим распределением вибрационных катков по массе²⁴: легкие ($M < 9000$ кг или $M_v = 0...5000$ кг), средние ($M = 9000...15000$ кг или $M_v = 5000...10000$ кг), тяжелые ($M = 15000...21000$ кг или $M_v = 10000...14000$ кг) и сверхтяжелые ($M > 21000$ кг или $M_v > 15000$ кг). Причем в группе легких вибрационных катков следует выделять подгруппу малогабаритных катков, имеющих общую массу до 5000 кг (массу вибровальцового модуля $M_v < 3000$ кг). С учетом наблюдаемого ступенчатого характера зависимостей $B(M_v)$ и $D(M_v)$ (см. рисунки 3 и 4) к полученным уравнениям регрессии диаметра и ширины вальца от массы вибровальцового

модуля следует относиться критически, так как они не отражают реальную взаимосвязь между данными параметрами, хотя при этом характеризуются сравнительно высоким значением коэффициента детерминации.

Представляется, что с течением времени производители сформировали рациональные соотношения между диаметром, а также шириной вальца в зависимости от массы вибровальцового модуля M_v (или массы машины M), с учетом проходимости на слабых грунтах, поперечной устойчивости, обеспечения видимости и управляемости, технологических возможностей, требований унификации производства, а также транспортного габарита для перевозки данного вида спецтехники. Так, например, максимальный допустимый диаметр вальца ограничивается обзорностью оператора вибрационного грунтового катка (в РФ – в соответствии с п.10.2 ГОСТ Р ИСО 5006–2010²⁵) и массой вибровальцового модуля M_v .

Наличие установившихся рациональных соотношений между шириной вальца, массой машины M и массой вибровальцового модуля M_v отражаются в высоких значениях коэффициента детерминации для линейной статической нагрузки ($q_{лсн}$) вибрационных грунтовых катков различных поколений (рисунок 5, см. таблицу 1, а также²⁶).

Большинство грунтовых катков являются вибрационными. Это позволяет повысить эффективность уплотнения наиболее распространенных в строительстве несвязных и малосвязанных грунтов [1, 2].

Уплотняющие возможности вибрационных катков во многом определяются их динамическими характеристиками, к которым относятся вынуждающая сила и частота колебаний.

Традиционно у большинства моделей вибрационных катков предусмотрено два режима колебаний. Режиму максимальной вибрации соответствует высокая вынуждающая сила P_1 при пониженной частоте колебаний f_1 , а режиму минимальной вибрации – пониженная вынуждающая сила P_2 при более высокой частоте колебаний f_2 .

²⁴ ГОСТ 31548–2012 Катки дорожные самоходные. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2013. 16 с.

²⁵ ГОСТ Р ИСО 5006–2010 Машины землеройные. Поле обзора оператора. Метод испытания и критерии функционирования. М.: Стандартинформ, 2011. 20 с.

²⁶ Шорохов Д.А. Анализ параметров оценки динамического воздействия вибрационных катков // Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных: сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, приуроченной к празднованию 300-летия Российской академии наук, Омск, 25–26 апреля 2024 года. Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2024. С. 44–49.

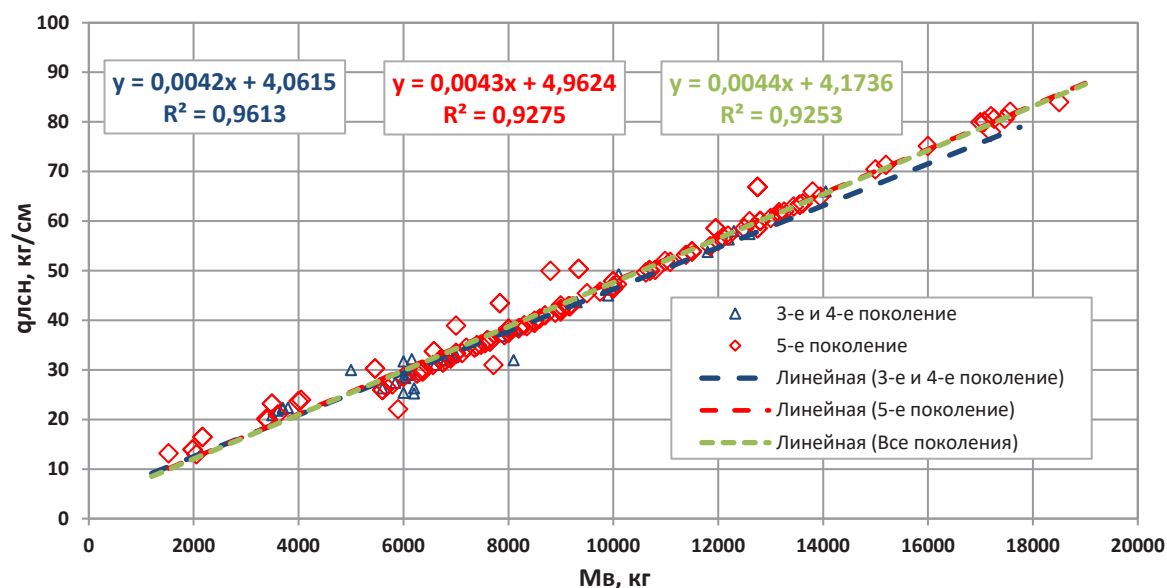


Рисунок 5 – Графическое представление взаимосвязи массы вибрационного модуля M_b и линейной статической нагрузки $q_{лсн}$
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Graphical representation of the relationship between the mass of the vibratory module M_b and the linear static load $q_{лсн}$
Source: compiled by the authors.

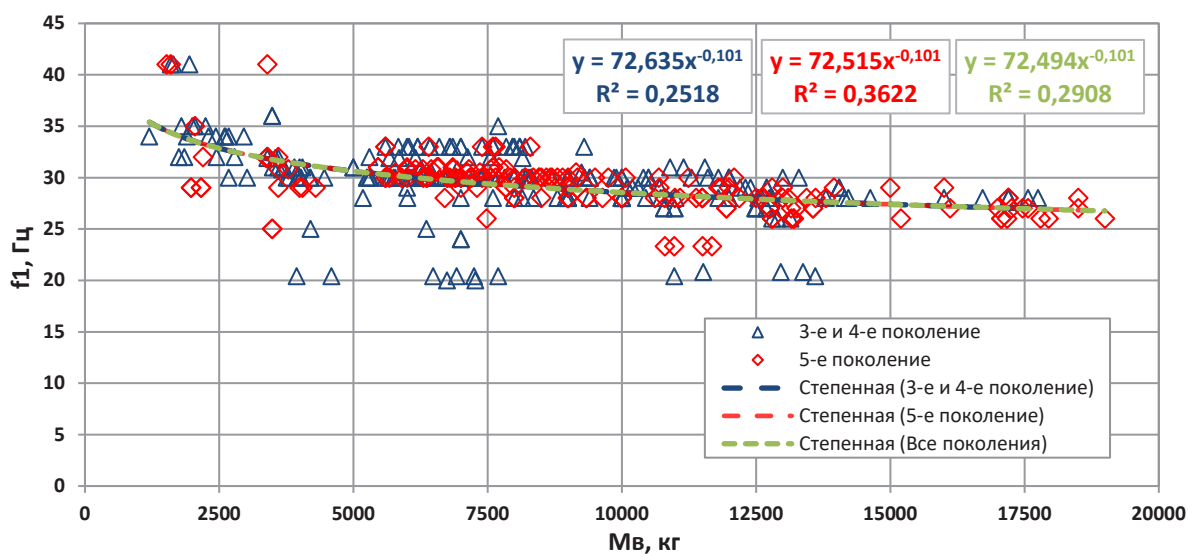


Рисунок 6 – Графическое представление взаимосвязи массы вибрационного модуля M_b и частоты колебаний f_1 для режима максимальной вибрации
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Graphical representation of the relationship between the mass of the vibratory module M_b and the oscillation frequency f_1 in the «maximum vibration» mode
Source: compiled by the authors.

На некоторых моделях вибрационных катков DYNAPAC и BOMAG имеется возможность реализации нескольких значений вынуждающей силы (как правило до 6) при фиксированной частоте колебаний^{27,28}. В «интеллектуальных» катках AMMANN от прохода к проходу изменяются значения частоты колебаний и вынуждающей силы вибровозбудителя^{29,30}.

Поэтому для анализа было принято решение рассматривать значения вынуждающей силы и частоты колебаний для двух режимов: максимальной вибрации (рисунки 6 и 8) и минимальной вибрации (рисунки 7 и 9).

Для режима «максимальная вибрация» при массе вибровальцового модуля от $M_g = 5000 \dots 15000$ кг частота колебаний находится преимущественно в диапазоне $f_1 = 20 \dots 35$ Гц (см. рисунок 6). При этом для 5-го поколения грунтовых катков нижняя грани-

ца частоты колебаний в режиме «максимальная вибрация» увеличилась с 20 до 23...26 Гц и уменьшился разброс значений частоты колебаний по сравнению с вибрационными катками 3-го и 4-го поколений (см. рисунок 6). Отмечается большое количество моделей катков всех поколений с частотами колебаний 28 и 30 Гц.

Для режима «минимальная вибрация» (см. рисунок 7) большинство значений частоты колебаний находится в диапазоне $f_2 = 28 \dots 39$ Гц. При этом отмечается большое количество моделей с частотами колебаний 33; 34; 35 и 36 Гц для катков всех поколений. Для катков 3-го и 4-го поколений частота колебаний f_2 находится в диапазоне значений 28...43 Гц (см. рисунок 7), а для катков 5-го поколения этот диапазон незначительно сужается и смещается вниз до 26...41 Гц (см. рисунок 7).

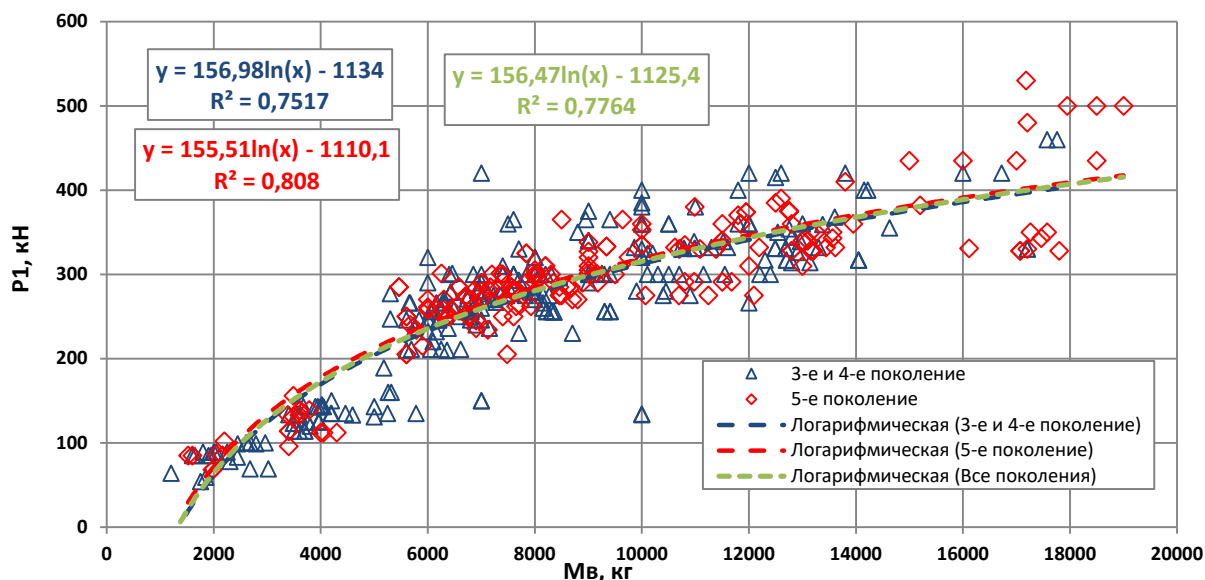


Рисунок 8 – Графическое представление взаимосвязи массы вибрационного модуля M_g и вынуждающей силы P_1
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Graphical representation of the relationship between the mass of the vibration module M_g and the forcing force P_1
Source: compiled by the authors.

²⁷ Equipment for Soil Compactors. Dynapac Compaction Optimizer. 3492 0024 01 // Dynapac Compaction Equipment AB. 4 p.

²⁸ VARIOCONTROL. Cost reduction through innovation 11/08 PRE 104 006 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.bomag.com/mobile/variocontrol/pdf/PRE104006_0811.pdf (дата обращения: 04.10.2024).

²⁹ White D.J., Vennapusa P.K. A review of roller-integrated compaction monitoring technologies for earthworks: Final Report ER10-04 // Final Report ER10-04. Earthworks Engineering Research Center (EERC), Department of Civil Construction and Environmental Engineering, Iowa State University, 2010. 36.

³⁰ Anderegg R., Von Felten D.A., Kaufmann K. Compaction monitoring using intelligent soil compactors // GeoCongress 2006 Geotech. Eng. Inf. Technol. Age. Atlanta, 2006. Vol. 2006, № Jönsson. 41.

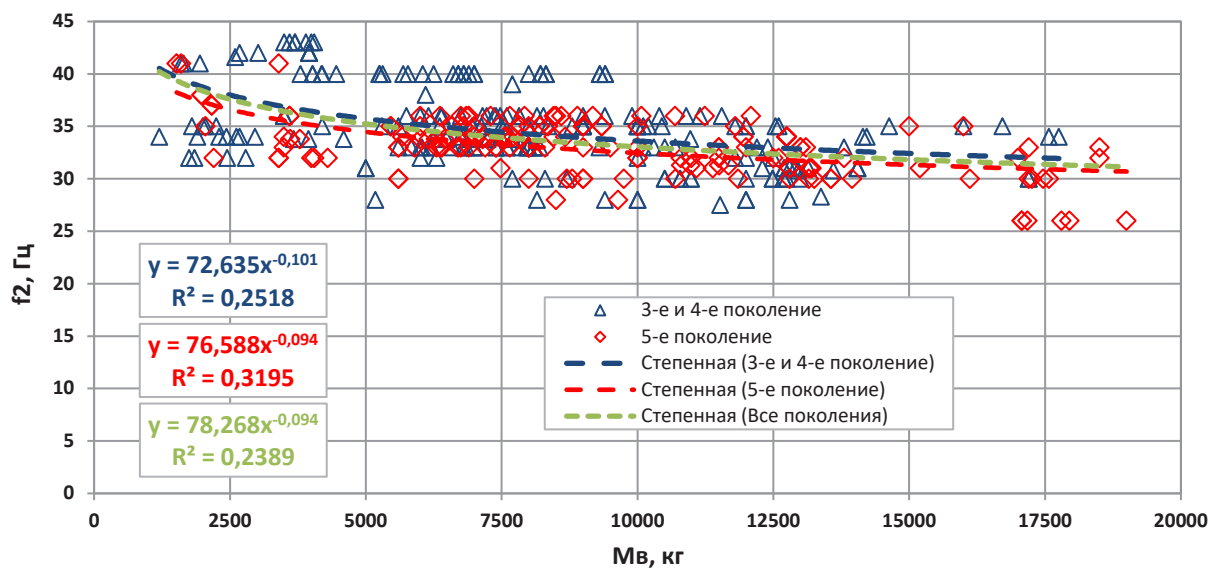


Рисунок 7 – Графическое представление взаимосвязи массы вибрационного модуля M_v и частоты колебаний f_2 для режима минимальной вибрации
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Graphical representation of the relationship between the mass of the vibratory module M_v and the oscillation frequency f_2 in the «minimum vibration» mode
Source: compiled by the authors.

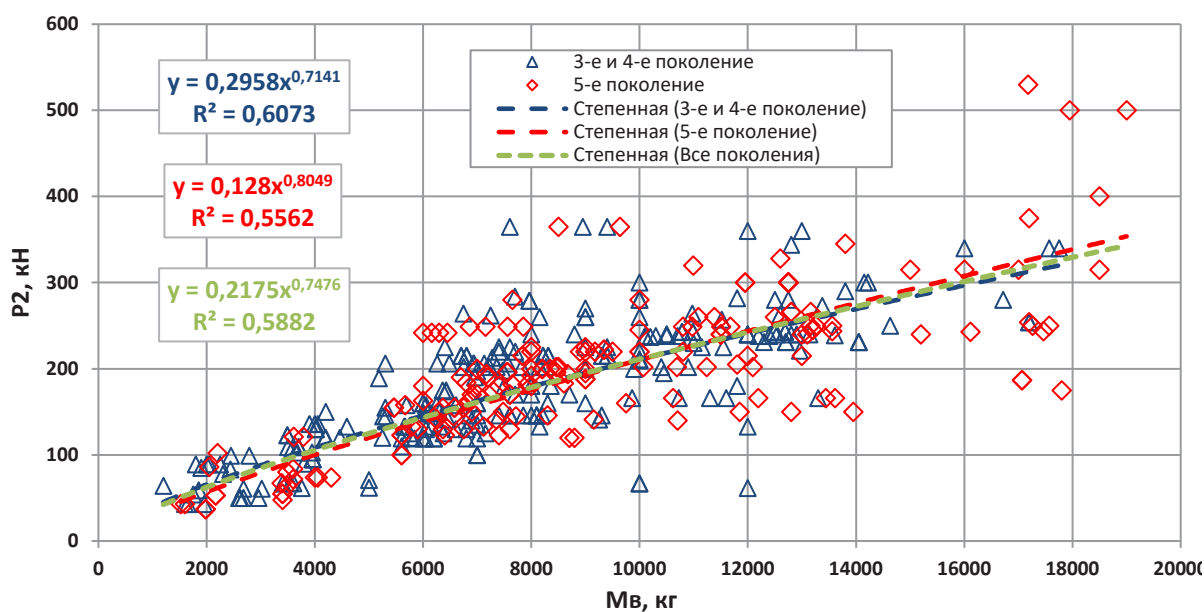


Рисунок 9 – Графическое представление взаимосвязи массы вибрационного модуля M_v и вынуждающей силы P_2
Источник: составлено авторами.

Figure 9 – Graphical representation of the relationship between the mass of the vibration module M_v and the forcing force P_2
Source: compiled by the authors.

Вынуждающая сила P_1 для режима максимальной вибрации машин 3-го и 4-го поколения находится в диапазоне 50...460 кН, а для машин 5-го поколения 80...500 кН. При этом наблюдается несколько диапазонов изменения значения вынуждающей силы (см. рисунок 8):

- для диапазонов масс малогабаритных машин ($M_g < 3000$ кг) вынуждающая сила равна 50...100 кН;
- для лёгких катков ($M_g = 3000...5000$ кг) вынуждающая сила составляет 100...150 кН;
- для самой многочисленной группы катков средней массы ($M_g = 5000...10000$ кг) вынуждающая сила находится в диапазоне 160...360 кН;
- для тяжелых ($M_g = 10000...14000$ кг) и сверхтяжелых ($M_g > 15000$ кг) катков вынуждающая сила составляет 330...520 кН.

Здесь прослеживается аналогия со ступенчатым характером изменения значений ширины и диаметра вальца при соответствующих диапазонах масс машин (см. рисунки 3 и 4).

Также стоит отметить (см. рисунки 8 и 9), что значения, выбивающиеся из общего ряда точек (при значениях $M_g = 10000$ и 12000 кг), принадлежат некоторым устаревшим моделям отечественных и китайских машин.

Для режима «минимальная вибрация» графическая зависимость $P_2(M_g)$ имеет более монотонный характер без наличия «ступеней» (см. рисунок 9). Диапазоны изменения значений вынуждающей силы P_2 для вибрационных катков 3–4-го и 5-го поколений практически совпадают при соответствующих массах машин. При этом разброс значений вынуждающей силы для режима «максимальная вибрация» составляет примерно 2,7 раза, что меньше, чем разброс значений для режима «минимальная вибрация» (примерно в 4,5 раза).

Относительная вынуждающая сила позволяет оценить влияние на характер колебаний вибрационного вальца свойств грунта вынуждающей силы колебаний и массы вибрационного модуля катка. В зависимости от сочетания параметров вибрационных машин, колебания (вибрационного вальца) могут носить харак-

тер с отрывом или без отрыва от грунта [18, 19]. Исследованиями Н.Я. Хархуты³¹ установлены критические значения относительной вынуждающей силы для различных частот колебаний вибровозбудителей грунтоуплотняющих машин, при которых начинает наблюдаться периодический отрыв рабочего органа от поверхности грунта. Грунтоуплотняющие машины, имеющие значения P/Q (P/Q_g) менее критического относятся к «вибрационным», а при значениях P/Q (P/Q_g) больше критического – к «вибротрамбующим» (виброударным)³².

В настоящее время исследователями и производителями вибрационных катков выделяются следующие режимы колебаний вибровальца: безотрывные колебания (режим «постоянный контакт» или continuous contact), колебания с периодическим отрывом от грунта («частичный отрыв» или partial uplift), режим «двойного прыжка» (double jump), режимы «раскачивания» (rocking motion) и «хаотических колебаний» (chaotic motion) [19]. Наиболее эффективно уплотнение грунтов в режиме «частичный отрыв»³³. Этот режим является основным в современных вибрационных катках. Режимы двойного прыжка, раскачивания и хаотических колебаний являются нежелательными и даже опасными, поэтому в процессе уплотнения их необходимо избегать³⁴ [19].

На рисунках 10 и 11 представлена взаимосвязь значений относительной вынуждающей силы (P_1/Q_g и P_2/Q_g) с массой вибровальцового модуля M_g для различных поколений вибрационных катков.

Анализ зависимости относительной вынуждающей силы для режимов «максимальная вибрация» (P_1/Q_g) и «минимальная вибрация» (P_2/Q_g) от массы вибровальцового модуля M_g показывает, что:

- 1) для всех моделей вибрационных катков 3-го, 4-го и 5-го поколений значения P_1/Q_g и P_2/Q_g превышают критические, следовательно все вибрационные катки реализуют ударно-вибрационные режимы колебаний с периодическим отрывом рабочего органа (вальца) от грунта;

³¹ Дорожные машины: Теория, конструкция и расчет: учебник для вузов / Н.Я. Хархута, М.И. Капустин, В.П. Семенов, И.М. Эвентов ; под общ. ред. Н.Я. Хархуты. 2-е изд., перераб. и доп. Ленинград : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1976. 471 с.

³² Там же.

³³ Adam D., Pistol J. Dynamic roller compaction for earthworks and roller-integrated continuous compaction control : State of the art overview and recent developments // Conf. di Geotec. di Torino, XXIV Ciclo. 2016. С 1–41.

³⁴ Уплотнение асфальтобетона и грунта. HAMM AG 03.2011 212 4832 / изд. 2-е. 2011. 142 с.

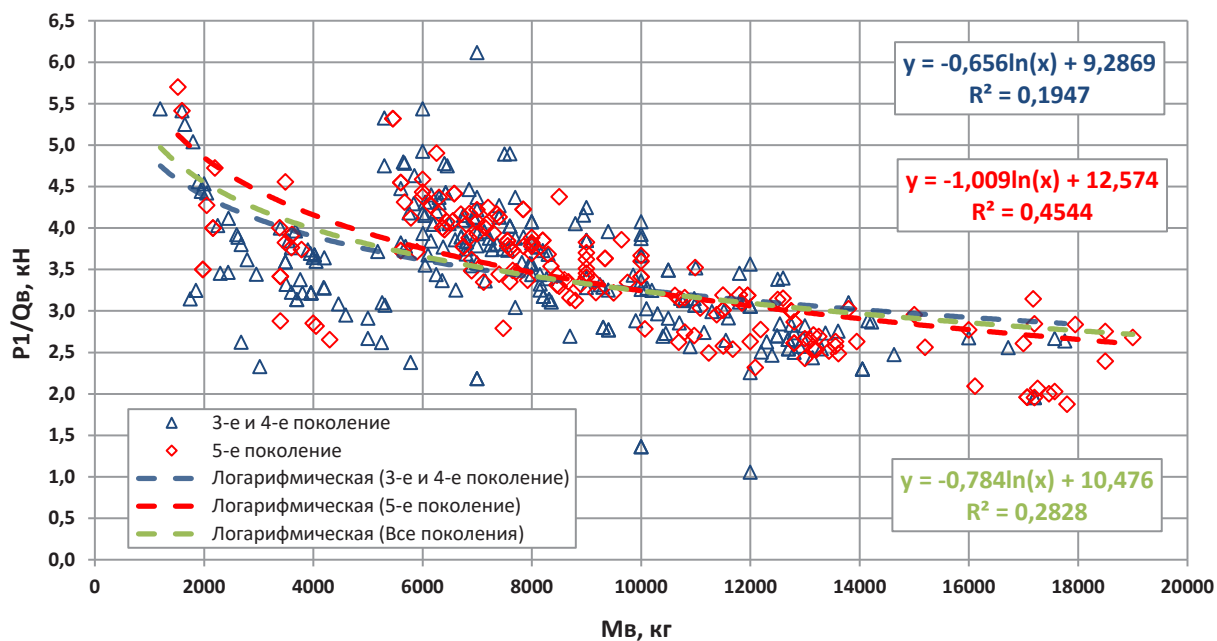


Рисунок 10 – Графическое представление взаимосвязи относительной вынуждающей силы P_1/Q_v и массы вибровальцового модуля M_v .
Источник: составлено авторами.

Figure 10 – Graphical representation of the relationship between the relative forcing force P_1/Q_v and the mass of the vibrating roller module M_v .
Source: compiled by the authors.

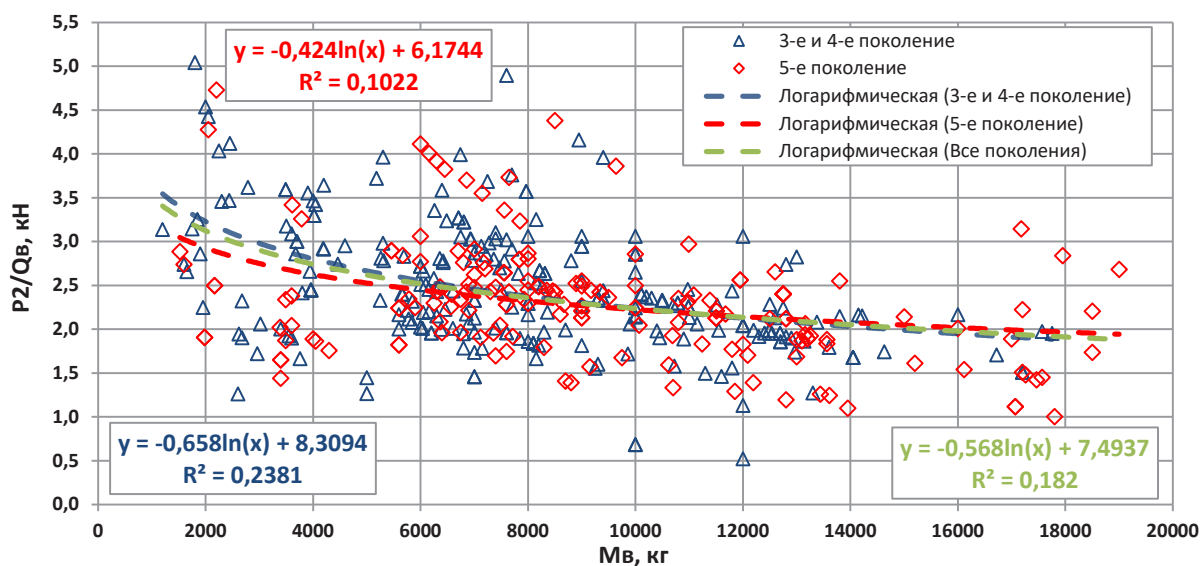


Рисунок 11 – Графическое представление взаимосвязи относительной вынуждающей силы P_2/Q_v и массы вибровальцового модуля M_v .
Источник: составлено авторами.

Figure 11 – Graphical representation of the relationship between the relative exciting force P_2/Q_v and the mass of the vibratory drum module M_v .
Source: compiled by the authors.

2) для режима «максимальная вибрация» характер изменения значений P_1/Q_g имеет разрывный (не монотонный) характер: выделяется два диапазона масс ($M_g < 5000$ кг и $M_g > 5000$ кг), в каждом из которых наблюдается гиперболическая зависимость $P_1/Q_g(M_g)$ с сопоставимыми диапазонами изменения значений P_1/Q_g ;

3) для всех моделей вибрационных катков 3-го, 4-го и 5-го поколений с увеличением массы вибровальцового модуля M_g уменьшаются значения относительной вынуждающей силы P_1/Q_g и P_2/Q_g ;

4) для разных поколений катков при сопоставимой массе вибровальцового модуля M_g разброс значений P_1/Q_g для машин 3-го и 4-го поколения достигает 3 раз. Для машин 5-го поколения разброс значений P_1/Q_g существенно меньше – до 1,5 раз;

5) разброс значений P_2/Q_g для катков 3-го и 4-го поколения сопоставимой массы вибровальцового модуля M_g может достигать 4 и более раз, а для катков 5-го поколения несколько меньше – до 3 раз;

6) разброс значений P_2/Q_g для катков различных поколений примерно в 1,3...2 раза превышает разброс значений P_1/Q_g .

На основании анализа взаимосвязи относительной вынуждающей силы от массы вибровальцового модуля M_g для режимов максимальной вибрации (P_1/Q_g) и минимальной вибрации (P_2/Q_g) можно сделать вывод, что вопрос обоснования численных значений вынуждающей силы изучен недостаточно, следствием чего является существенный разброс значений P_1 и P_2 для катков с сопоставимыми значениями M_g (в т.ч. различных поколений).

В режиме «максимальная вибрация» с увеличением вынуждающей силы катка возрастает энергия, передаваемая в грунт для его деформирования. Но с увеличением вынуждающей силы P_1 (и, соответственно P_1/Q_g) возрастает и сила реакции грунта. Предположитель-

но, максимальные значения P_1/Q_g в режиме «максимальная вибрация» ограничены переходом колебаний вибрационного вальца в нежелательные режимы (двойной прыжок и др.).

В режиме «минимальная вибрация» предположительно максимальные значения вынуждающей силы P_2 (и, соответственно, P_2/Q_g) определяются задачами уплотнения материалов малой прочности (гравий, известняковый щебень и т.д.), а также снижением воздействия вибрации на близлежащие здания и сооружения.

Обращает на себя внимание, что ступенчатый (не монотонный) характер изменения характеристик катков наблюдается и в зависимостях ширины и диаметра вальца в функции массы вибрационного модуля (см. рисунки 3 и 4), причем диапазоны M_g некоторых участков ступенчатой зависимости $P_1/Q_g(M_g)$ и $B(M_g)$, $D(M_g)$ при этом совпадают ($M_g < 5000$ кг и $M_g > 5000$ кг).

Для устранения разрыва на зависимости $P_1/Q_g(M_g)$ было предложено рассматривать значения P_1/Q_g , приведенные к ширине вальца, т.е. ввести новый параметр, который можно назвать «линейная относительная вынуждающая сила» $(P_1/Q_g)/B$, являющийся некоторым аналогом параметра «статическая линейная нагрузка», но учитывающем динамическое воздействие вибрационного вальца³⁵ (рисунки 12 и 13).

Это позволило не только устранить разрывный характер изменения зависимостей $P_1/Q_g(M_g)$ и $P_2/Q_g(M_g)$ (см. рисунки 10 и 11), но и уменьшить разброс значений относительно средних при соответствующих массах M_g . Для значений P_1/Q_g разброс относительно среднего составил 4 раза, а для $(P_1/Q_g)/B$ всего лишь около 2 раз. Зависимости линейной относительной вынуждающей силы (см. рисунки 2 и 13) также характеризуются более высокими значениями коэффициента детерминации уравнений регрессии для $(P_1/Q_g)/B$ и $(P_2/Q_g)/B$.

³⁵ Шорохов Д.А. Анализ параметров оценки динамического воздействия вибрационных катков // Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных: сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, приуроченной к празднованию 300-летия Российской академии наук, Омск, 25–26 апреля 2024 года. Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2024. С. 44–49. https://elibrary.ru/download/elibrary_67951441_35651376.pdf

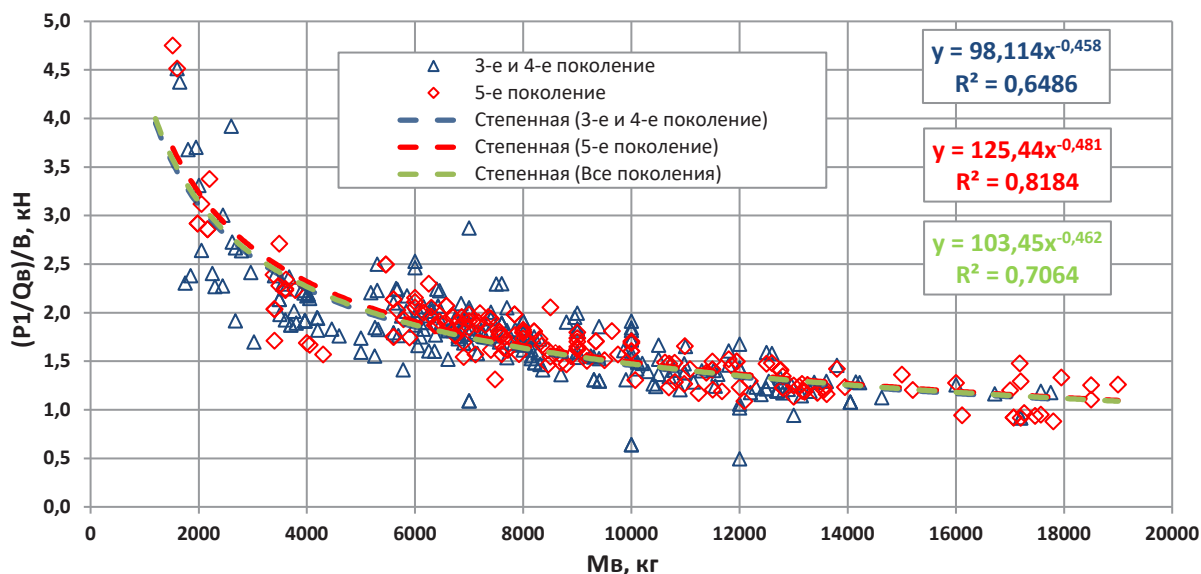


Рисунок 12 – Графическое представление взаимосвязи линейной относительной вынуждающей силы $(P_1/Q_B)/B$ и массы вибровальцового модуля M_b (режим максимальной вибрации)
Источник: составлено авторами.

Figure 12 – Graphical representation of the relationship between linear relative forcing force $(P_1/Q_B)/B$ and the mass of the vibrating roller module M_b (maximum vibration mode)
Source: compiled by the authors.

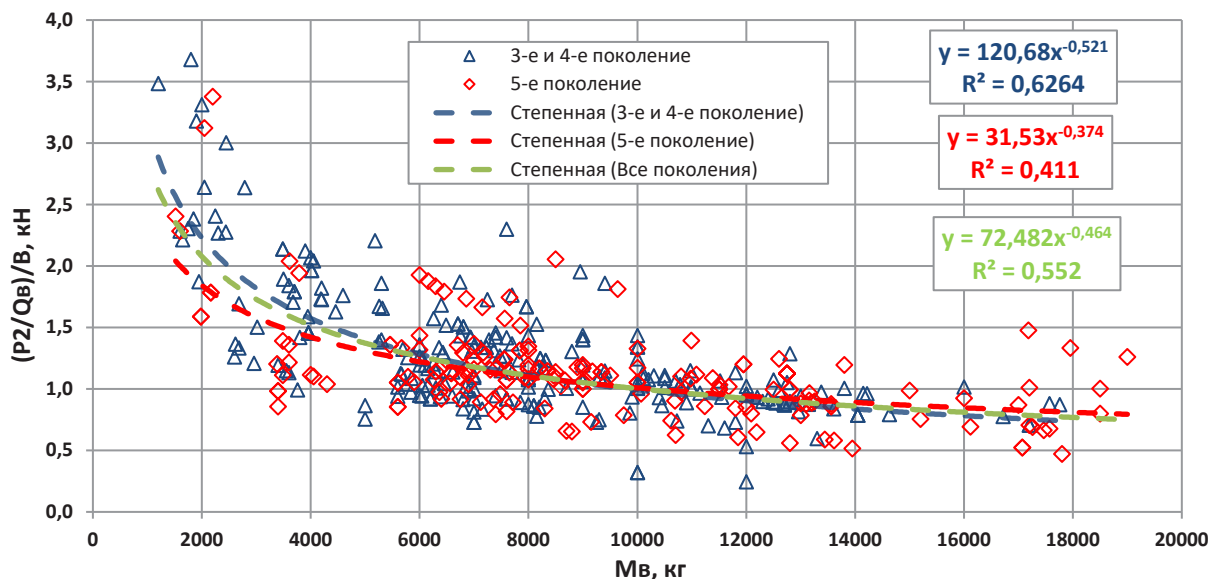


Рисунок 13 – Графическое представление взаимосвязи линейной относительной вынуждающей силы $(P_2/Q_B)/B$ и массы вибровальцового модуля M_b (режим максимальной вибрации)
Источник: составлено авторами.

Figure 13 – Graphical representation of the relationship between linear relative forcing force $(P_2/Q_B)/B$ and the mass of the vibrating roller module M_b (maximum vibration mode)
Source: compiled by the authors.

ОБСУЖДЕНИЕ

Разбиение вибрационных катков на группы по массе обусловлено не только их технологическим назначением, но и общностью основных технических характеристик (ширины и диаметра вальца, вынуждающей силы колебаний).

С уменьшением массы вибровальцового модуля увеличивается частота и относительная вынуждающая сила колебаний, что характерно не только для вибрационных катков, но и для всех ударно-вибрационных грунтоуплотняющих машин [21]. Это обусловлено тем, что при уменьшении статической составляющей передаваемых в грунт напряжений необходима их компенсация за счет возрастания динамической составляющей, что приводит к необходимости увеличения относительной вынуждающей силы колебаний. Но для предотвращения перехода колебаний в нежелательные режимы, увеличение относительной вынуждающей силы необходимо сопровождать увеличением частоты колебаний [22], что подтверждается результатами, представленными в данной статье, а также согласуется с принципами регулирования частоты и вынуждающей силы колебаний вибрационных катков некоторых ведущих мировых производителей (например, AMMANN/CASE [18]), оснащенных системами интеллектуального уплотнения. При этом большое значение имеют и другие характеристики катка, такие как количество и характеристики амортизаторов, соотношение масс вальца и рамы и др. Следовательно, для анализа функционирования вибрационного катка и повышения эффективности его использования при уплотнении грунта необходимо совместно анализировать влияние относительной вынуждающей силы, частоты колебаний, соотношение массы вальца и его рамы [23, 24], характеристик амортизаторов и свойств грунта, что недостаточно исследовалось в известных работах (например, [25, 26, 27, 28, 29] и др.).

Продолжающиеся теоретические и экспериментальные исследования уплотнения вибрационными катками каменных материалов показывают целесообразность применения для уплотнения данных крупнозернистых материалов пониженных частот колебаний 15...18 Гц [30, 31]. Ожидаемое при этом снижение потребляемой мощности и расхода топлива, увеличение ресурса вибровозбудителя, а также повышение эффективности уплотнения данных материалов может привести к рас-

ширению диапазона частот колебаний вибрационных катков, а именно понижению нижней границы частотного диапазона до 15...18 Гц для более эффективного уплотнения каменных материалов. Однако при этом может снижаться устойчивость колебаний (вследствие приближения частоты колебаний вальца к собственной частоте колебаний уплотняемого материала) и повышается опасность перехода колебаний в нежелательные режимы [22], [32].

Накопление опыта в области исследований, производства и применения вибрационных грунтовых катков приводит к уменьшению разброса значений основных характеристик вибрационных катков при смене поколений. Это относится к таким параметрам, как вынуждающая сила, частота колебаний, относительная вынуждающая сила. При этом диапазоны изменения значений данных параметров несколько смещаются.

По таким параметрам, как мощность двигателя, отвечающая за ходовые качества, проходимость и преодолеваемый уклон, диаметр и ширина обечайки вальца, соотношение эксплуатационной массы катка к массе вибрационного модуля у производителей сложилось единое мнение, практически не изменяющееся для различных поколений машин, что также отражается в виде довольно высоких значений коэффициента детерминации (см. таблицу 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье на основании статистического анализа технических характеристик вибрационных грунтовых катков 3–5-го поколений, выпускавшихся с конца 1990-х годов и по настоящее время, выявлены и проанализированы некоторые закономерности развития данного вида техники.

Определены диапазоны изменения основных технических характеристик вибрационных катков различных поколений в зависимости от массы машины (вибрационного модуля) и выявлены тенденции изменения этих параметров при переходе к различным поколениям грунтовых катков.

Установлена тенденция увеличения массы грунтовых вибрационных катков и увеличения количества тяжёлых ($M = 15000...21000$ кг или $M_g = 10000...14000$ кг) и сверхтяжёлых ($M > 21000$ кг или $M_g > 15000$ кг) моделей при одновременном уменьшении количества моделей малогабаритных ($M < 5000$ кг, $M_g < 3000$ кг) и легких ($M = 5000...9000$ кг, $M_g = 3000...5000$ кг) катков. Предполагается, что малогабаритные

катки (с $M_g < 3000$ кг) замещаются тяжелыми самоходными виброплитами, имеющими более высокую глубину уплотнения за счет большей площади контактной поверхности с грунтом при существенно меньшей массе и стоимости³⁶.

Анализ зависимости $P_1/Q_g(M_g)$ (см. рисунок 10) показывает наличие не одной общей, а двух различных гиперболических зависимостей и существенный разброс данных, что отражается в низком значении коэффициента детерминации R^2 . Для уменьшения разброса было предложено рассматривать значения P_1/Q_g , приведенные к ширине вальца B , т.е. ввести новый параметр «линейная относительная вынуждающая сила» ($P_1/Q_g/B$), который целесообразно использовать совместно с параметром «относительная вынуждающая сила». Это позволило устранить ступенчатый характер зависимости $P_1/Q_g(M_g)$ и уменьшить разброс значений P_1/Q_g и P_2/Q_g (см. рисунки 12 и 13). Однако при анализе не относительных, а абсолютных значений вынуждающей силы использование вместо P_1 и P_2 значений P_1/B и P_2/B показало не улучшение, а ухудшение значения коэффициента детерминации R^2 . Данный вопрос представляет научный интерес и требует более глубокого изучения.

На эффективность уплотнения вибрационными катками различных материалов, кроме параметров, указывающихся в технических характеристиках вибрационных катков, большое влияние оказывают количество и характеристики амортизаторов вальца, а также соотношение масс вальца и его рамы³⁷. К сожалению, производители не указывают данную информацию в технических характеристиках вибрационных катков.

Данное исследование охватывает широкий диапазон моделей вибрационных катков различных отечественных и зарубежных производителей, выпускавшихся в течение последних 20...30 лет, расширяет и дополняет результаты [17]. Это позволяет производителям вибрационных катков, а также исследователям уплотнения грунтов вибрационными машинами уточнять диапазоны изменения различных характеристик вибрационных катков при моделировании их функционирования, выявлять некоторые тенденции развития данного вида машин, обосновывать технические характе-

ристики вибрационных катков при проектировании и модернизации. Результаты анализа показывают, что в настоящее время среди производителей и исследователей нет единого мнения о методике обоснования основных технических характеристик грунтовых вибрационных катков, что выражается в достаточно большом разбросе значений параметров, определяющих динамическое воздействия вибрационных катков на уплотняемый материал (частоты колебаний и относительной вынуждающей силы).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тимофеев Д.М. Основные факторы и их зависимости, определяющие оптимальные режимы работы вибрационных катков при уплотнении песчаных грунтов // Инженерный вестник Дона. 2019. № 1(52). С. 138. http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_78_Timofeev_1.pdf_4021ab4e6b.pdf
2. Тюремов И.С., Игнатьев А.А. Уплотнение грунтов вибрационными катками: монография. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2012. 140 с.
3. Пермьяков В.Б., Захаренко А.В., Савельев С.В. Обоснование выбора параметров вибрационных катков // Известия вузов. Строительство. 2003. № 2. С. 100–103.
4. Тимофеев Д.М. Оценка эффективности применения грунтоуплотняющих машин и механизмов // Инженерный вестник Дона. 2018. № 1(48). С. 74. http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_133_Timofeev.pdf_8efc46a15c.pdf
5. Adam D. Roller Integrated Continuous Compaction Control (CCC) Technical Contractual Provisions & Recommendations // Des. Constr. Pavements Rail Tracks Geotech. Asp. Process. Mater. / ed. Correia A.G. et al. Taylor & Francis Group, London, UK, 2007. P. 111–138.
6. Pistol J. et al. An advanced ICMV for vibratory roller compaction // Acta Geotech. 2024. doi: 10.1007/s11440-024-02342-8
7. Попов Ю.Г., Малов Г.С., Красников А.С. Моделирование и оптимизация двухамплитудного дебаланса с подвижной внутренней массой // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2023. № 6(759). С. 30–38. doi: 10.18698/0536-1044-2023-6-30-38
8. Вибрационные устройства с асимметричными колебаниями: Часть 1 / М. Д. Герасимов, С.Н. Глаголев, Н.С. Любимый, С.С. Латышев. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2023. – 144 с.
9. Shi M. et al. Effective compaction power index for real-time compaction quality assessment of coarse-

³⁶ Марышев Б.С. Большие возможности при малой цене. Реверсивные виброплиты // Строительная техника и технологии. 2002. № 1. С. 46–48.

³⁷ Костельов М.П. Уплотнению асфальтобетона требуется обновленное поколение дорожных катков // Каталог-справочник «Дорожная техника и технологии». 2003. С. 12–22.

grained geomaterials: Proposal and comparative study // *Constr. Build. Mater.* 2022. Vol. 321. P. 126375. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126375>

10. Fathi A. et al. Assessing depth of influence of intelligent compaction rollers by integrating laboratory testing and field measurements // *Transp. Geotech.* 2021. Vol. 28. P. 100509. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100509>

11. Xu G. et al. The pioneer of intelligent construction—An overview of the development of intelligent compaction // *J. Road Eng.* 2022. Vol. 2, № 4. P. 348–356. <https://doi.org/10.1016/j.jreng.2022.12.001>

12. Chen C. et al. Intelligent compaction quality evaluation based on multi-domain analysis and artificial neural network // *Constr. Build. Mater.* 2022. Vol. 341. P. 127583. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127583>

13. Briaud J.L., Seo J. Intelligent compaction: Overview and Research Needs // *Texas A&M Univ.* 2003. P. 1–84.

14. Тюремнов И.С. Обзор систем непрерывного контроля уплотнения грунта для вибрационных катков. Часть 3. Особенности функционирования и “интеллектуальное уплотнение” // *Вестник Тихоокеанского государственного университета*. 2016. № 2(41). С. 115–122. <http://pnu.edu.ru/vestnik/pub/articles/2226/>

15. «Интеллектуальное уплотнение»: дерзкий замысел или объективная реальность? // *Строительные и дорожные машины*. 2007. № 8. С. 8–13.

16. Тюремнов И.С., Филатов И.С., Игнатьев А.А. Обзор рекомендаций производителей по использованию вибрационных катков для уплотнения грунта // *Вестник Тихоокеанского государственного университета*. 2014. № 2(33). С. 155–162. <http://pnu.edu.ru/vestnik/pub/articles/1961/>

17. Тюремнов И.С., Игнатьев А.А., Филатов И.С. Статистический анализ технических характеристик грунтовых вибрационных катков // *Вестник Тихоокеанского государственного университета*. 2014. № 3(34). С. 81–88. <https://vestnik.pnu.edu.ru/vestnik/pub/articles/1987/>

18. Anderegg R., Kaufmann K. Intelligent Compaction with Vibratory Rollers // *Transp. Res.* 2004. Vol. 1868. P. 124–134.

19. Adam D., Kopf F. Operational Devices for Compaction Optimization and Quality Control (Continuous Compaction Control & Light Falling Weight Device) // *Proc. Int. Semin. Geotech. Pavement Railw. Des. Constr. Athens, Greece*. 2004. P. 97–106.

20. Тюремнов И.С., Шорохов Д.А. Моделирование взаимодействия вибрационного катка с уплотняемым грунтом // *Вестник СибАДИ*. 2024. Vol. 21, № 2. С. 202–216. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-202-216>

21. Тюремнов И.С. Анализ технических характеристик различных типов ударно-вибрационных грунтоуплотняющих машин // *Вестник СибАДИ*. 2023. Vol. 20, № 6(94). С. 706–716. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-706-716>

22. Тюремнов И.С. Исследование влияния динамических характеристик вибрационного катка на

особенности взаимодействия элементов системы «рама-валец-грунт». Научный рецензируемый журнал «Вестник СибАДИ». 2025;22(3):396-416. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-396-416>

23. Yoo T.-S., Selig E.T. Dynamics of Vibratory-Roller Compaction // *J. Geotech. Eng. Div. ASCE*. 1979. № 105 (GT10). P. 1211–1231.

24. Тарасов В.Н., Бояркина И.В., Серебренников В.С. Влияние массы вертикального пригруза на амплитуду колебаний вибровальца и виброзащиту рамы дорожного катка // *Строительные и дорожные машины*. 2019. № 9. С. 30–36.

25. Шабанова Г.И., Савельев С.В., Бурый Г.Г. Математическое описание колебательной системы “вибрационный рабочий орган - грунт” // *Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии*. 2013. № 3(31). С. 102–107. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_19032661_60709817.pdf

26. Шишкин Е.А., Смоляков А.А. Обоснование способа регулирования контактного усилия вибрационного вальца с уплотняемым материалом // *Системы. Методы. Технологии*. 2022. № 1(53). С. 36–42. DOI: 10.18324/2077-5415-2022-1-36-42

27. Teramoto S., Ito S., Kobayashi T. Deep learning-based soil compaction monitoring: A proof-of-concept study // *J. Terramechanics*. 2024. Vol. 111. P. 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2023.10.001>

28. Bratu P., Tonciu O., Nițu M.C. Modeling the Vibratory Compaction Process for Roads // *Buildings*. 2023. Vol. 13, № 11. <https://doi.org/10.3390/buildings13112837>

29. Lu Y. et al. Research on vibratory & oscillatory coexistence nonlinear dynamics based on drum-subgrade coupling model // *Int. J. Non. Linear. Mech.* 2023. Vol. 157. P. 104536. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2023.104536>

30. Wersäll C., Nordfelt I., Larsson S. Soil compaction by vibratory roller with variable frequency // *Géotechnique*. ICE Publishing, 2016. Vol. 67, № 3. P. 272–278. DOI: 10.1680/jgeot.16.P.051

31. Wu K. et al. Discrete Element Modeling of Vibration Compaction Effect of the Vibratory Roller in Roundtrips on Gravels // *J. Test. Eval.* 2021. Vol. 49. P. 20190910. <https://doi.org/10.1520/JTE20190910>

32. Тюремнов И.С. Исследование влияния динамических характеристик вибрационного катка на особенности взаимодействия элементов системы «рама-валец-грунт». Научный рецензируемый журнал «Вестник СибАДИ». 2025;22(3):396-416. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-396-416>

REFERENCES

1. Timofeev D.M. Key Factors and Dependencies Determining Optimal Operating Modes of Vibratory Rollers for Sand Compaction. *Engineering Bulletin of Don*. 2019; 1(52): 138. (in Russ.) http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_78_Timofeev_1.pdf_4021ab4e6b.pdf

2. Tyuremnov I.S., Ignat'ev A.A. Uplotnenie gruntov vibratsionnymi katkami : monografiya. YAroslavl: Izd-vo YAGTU, 2012. 140 p. (in Russ.)

3. Permyakov V.B., Zakharenko A.V., Savel'ev S.V. Obosnovanie vybora parametrov vibratsionnykh katkov. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2003; 2: 100–103. (in Russ.)
4. Timofeev D.M. Otsenka effektivnosti primeneniya gruntouplotnyayushchikh mashin i mekhanizmov. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2018; № 1(48): 74. (in Russ.) http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_133_Timofeev.pdf_8efc46a15c.pdf
5. Adam D. Roller Integrated Continuous Compaction Control (CCC) Technical Contractual Provisions & Recommendations. *Des. Constr. Pavements Rail Tracks Geotech. Asp. Process. Mater.* / ed. Correia A.G. et al. Taylor & Francis Group, London, UK, 2007: 111–138.
6. Pistol J. et al. An Advanced ICMV for Vibratory Roller Compaction. *Acta Geotechnica*. 2024. doi: [10.1007/s11440-024-02342-8](https://doi.org/10.1007/s11440-024-02342-8)
7. Popov YU.G., Malov G.S., Krasnikov A.S. Modelirovanie i optimizatsiya dvukhampitudnogo debalansa s podvizhnoy vnutrenney massoy. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye*. 2023; 6(759): 30–38. (in Russ.) doi: [10.18698/0536-1044-2023-6-30-38](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-6-30-38)
8. Vibratsionnye ustroystva s asimmetrichnymi kolebaniyami: CHast' 1 / M. D. Gerasimov, S.N. Glagolev, N.S. Lyubimyy, S.S. Latyshev. – Belgorod : Belgorodskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskii universitet im. V. G. SHukhova, 2023. – 144 p. (in Russ.)
9. Shi M. et al. Effective Compaction Power Index for Real-Time Quality Assessment of Coarse-Grained Geomaterials: Proposal and Comparative Study. *Construction and Building Materials*. 2022; 321: 126375. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126375>
10. Fathi A. et al. Assessing Depth of Influence of Intelligent Compaction Rollers by Integrating Laboratory Testing and Field Measurements. *Transportation Geotechnics*. 2021; 28: 100509. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100509>
11. Xu G. et al. The Pioneer of Intelligent Construction-An Overview of the Development of Intelligent Compaction. *Journal of Road Engineering*. 2022; 2(4): 348–356. <https://doi.org/10.1016/j.jreng.2022.12.001>
12. Chen C. et al. Intelligent Compaction Quality Evaluation Based on Multi-Domain Analysis and Artificial Neural Network. *Construction and Building Materials*. 2022; 341: 127583. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127583>
13. Briaud J.L., Seo J. Intelligent Compaction: Overview and Research Needs. *Texas A&M University*. 2003: 1–84.
14. Tyuremnov I.S. Obzor sistem nepreryvnogo kontrolya uplotneniya grunta dlya vibratsionnykh katkov. CHast' 3. Osobennosti funktsionirovaniya i "intellektual'noe uplotnenie". *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2016; 2(41): 115–122. (in Russ.) <http://pnu.edu.ru/vestnik/pub/articles/2226/>
15. «Intellektual'noe uplotnenie»: derzhkiy zamyсел ili ob"ektivnaya real'nost'? *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2007; 8: 8–13. (in Russ.)
16. Tyuremnov I.S., Filatov I.S., Ignat'ev A.A. Obzor rekomendatsiy proizvozhiteley po ispol'zovaniyu vibratsionnykh katkov dlya uplotneniya grunta. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2014; 2(33):155–162. (in Russ.) <http://pnu.edu.ru/vestnik/pub/articles/1961/>
17. Tyuremnov I.S., Ignat'ev A.A., Filatov I.S. Statisticheskii analiz tekhnicheskikh kharakteristik gruntovykh vibratsionnykh katkov. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2014; 3(34): 81–88. (in Russ.) <https://vestnik.pnu.edu.ru/vestnik/pub/articles/1987/>
18. Anderegg R., Kaufmann K. Intelligent Compaction with Vibratory Rollers. *Transportation Research*. 2004; 1868: 124–134.
19. 25. Adam D., Kopf F. Operational Devices for Compaction Optimization and Quality Control (Continuous Compaction Control & Light Falling Weight Device). *Proc. Int. Semin. Geotech. Pavement Railway Design and Construction. Athens, Greece*. 2004: 97–106.
20. Tyuremnov I.S., Shorohov D.A. Vibrating roller with compacted soil interaction modelling. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21(2): 202-216. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-202-216>
21. Tyuremnov I.S. Technical parameters analyses of different types of impact-vibration soil compacting machines. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20(6): 706-716. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-706-716>
22. Tyuremnov I.S. Investigation into the influence of vibratory roller dynamic characteristics on interaction features of Frame-Drum-Soil system elements. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22(3): 396-416. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-396-416>
23. Yoo T.-S., Selig E.T. Dynamics of Vibratory-Roller Compaction. *Journal of Geotechnical Engineering Division ASCE*. 1979; 105(GT10): 1211–1231.
24. Tarasov V.N., Boyarkina I.V., Serebrennikov V.S. Vliyanie massy vertikal'nogo prigruga na amplitudu kolebaniy vibroval'tsa i vibrozashchitu ramy dorozhnogo katka. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2019; 9: 30–36. (in Russ.)
25. Shabanova G.I., Savel'ev S.V., Buryy G.G. Matematicheskoe opisanie kolebatel'noy sistemy "vibratsionnyy rabochiy organ - grunt". *Vestnik Sibirskoy gosudarstvennoy avtomobil'no-dorozhnoy akademii*. 2013; 3(31):102–107. (in Russ.) https://www.elibrary.ru/download/elibrary_19032661_60709817.pdf
26. Shishkin E.A., Smolyakov A.A. Obosnovanie sposoba regulirovaniya kontaktnogo usiliya vibratsionnogo val'tsa s uplotnyaemym materialom. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. 2022; 1(53): 36–42. (in Russ.) DOI [10.18324/2077-5415-2022-1-36-42](https://doi.org/10.18324/2077-5415-2022-1-36-42)
27. Teramoto S., Ito S., Kobayashi T. Deep Learning-Based Soil Compaction Monitoring: A Proof-of-Concept Study. *Journal of Terramechanics*. 2024; 111: 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2023.10.001>

28. Bratu P., Tonciu O., Nițu M.C. Modeling the Vibratory Compaction Process for Roads. *Buildings*. 2023; 13(11). <https://doi.org/10.3390/buildings13112837>

29. Lu Y. et al. Research on Vibratory & Oscillatory Coexistence Nonlinear Dynamics Based on Drum-Subgrade Coupling Model. *International Journal of Nonlinear Mechanics*. 2023; 157: 104536. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2023.104536>

30. Wersäll C., Nordfelt I., Larsson S. Soil Compaction by Vibratory Roller with Variable Frequency. *Géotechnique. ICE Publishing*, 2016; 67(3): 272–278. DOI: 10.1680/jgeot.16.P.051

31. Wu K. et al. Discrete Element Modeling of Vibration Compaction Effect of the Vibratory Roller in Roundtrips on Gravels. *Journal of Testing and Evaluation*. 2021; 49: 20190910. <https://doi.org/10.1520/JTE20190910>

32. Tyuremnov I.S. Investigation into the influence of vibratory roller dynamic characteristics on interaction features of Frame-Drum-Soil system elements. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025;22(3):396-416. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-396-416>.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

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

Шорохов Д.А. Сбор информации о технических характеристиках грунтовых вибрационных катков, статистическая обработка данных, подготовка текста статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Tyuremnov Ivan S. General workflow organization, manuscript preparation.

Shorohov Dmitrii A. Data collection on the technical specifications of ground vibratory rollers, statistical data processing, manuscript preparation.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

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

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1825-0676>,

SPIN-код: 6483-6955,

e-mail: shorohovda@ystu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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

SPIN-код: 9976-0728,

e-mail: tyuremnovis@yandex.ru

Shorohov Dmitrii A. – Post-graduate student of the Construction and Road Machines Department, Yaroslavl State Technical University, (88, Moskovsky Prospekt, Yaroslavl, 150023).

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1825-0676>,

SPIN-код: 6483-6955,

e-mail: shorohovda@ystu.ru