

УДК 625.084: 534.08

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-182-195>

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ УСКОРЕНИЙ КОЛЕБАНИЙ ВИБРОВАЛЬЦА КАТКА DM-617 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА

И.С. Тюремнов, С.Н. Иванов, А.С. Краюшкин
ФГБОУ ВО «ЯГТУ»,
г. Ярославль, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Для решения задач модернизации грунтовых вибрационных катков с целью повышения уплотняющей способности, надежности и вибробезопасности осуществляется математическое моделирование взаимодействия элементов вибрационного катка между собой и с уплотняемым грунтом. Достоверность разрабатываемых математических моделей проверяется посредством их верификации, т.е. сопоставления с результатами экспериментальных исследований. Однако известные результаты экспериментальных исследований выполнялись на сравнительно небольшом перечне моделей вибрационных катков и видах грунта, а также в установившемся режиме колебаний. В статье представлены результаты экспериментальных исследований вертикальных ускорений колебаний вибровальца катка как в режиме установившейся вибрации, так и в переходных режимах при включении (разгоне) и выключении (останове) вибровозбудителя, что расширяет диапазон возможностей верификации существующих и вновь разрабатываемых математических моделей.

Материалы и методы. Экспериментальные исследования вертикальных ускорений колебаний вибровальца выполнялись на вибрационном катке DM-617 при уплотнении природной песчано-гравийной смеси. Показания акселерометра содержат высокочастотные гармоники, существенно затрудняющие определение численных значений амплитудных значений ускорений вибровальца, поэтому для цифровой обработки был применен фильтр низких частот с граничной частотой 200 Гц.

Результаты. Установлено, при уплотнении грунта вибрационным катком DM-617 с максимальным вынуждающим усилием в диапазоне изменения динамического модуля деформации грунта $E_{vd}=14...25$ МПа, амплитудные значения ускорений вертикальных колебаний вибровальца составляют от +65...+77 до -61...-69 м/с². При включении (разгоне) вибровозбудителя амплитудные значения ускорений в 1,1 раза превышают значения вертикальных ускорений установившегося режима работы вибровальца и практически не зависят от значения динамического модуля деформации грунта E_{vd} . При выключении (останове) вибровозбудителя амплитудные значения вертикальных ускорений не превышают значений вертикальных ускорений установившегося режима работы вибровальца.

Обсуждение и заключение. Независимость амплитудных значений вертикальных ускорений вибровальца катка DM-617 от значений динамического модуля деформации грунта E_{vd} согласуется с полученными ранее результатами экспериментальных исследований колебаний вибровальца катка DM-614. Полученные численные значения вертикальных ускорений колебаний вибровальца катка DM-617 в режимах установившихся колебаний, а также при включении (разгоне) и выключении (останове) вибровозбудителя позволяют осуществлять верификацию существующих и разрабатываемых математических моделей взаимодействия вибрационных катков с уплотняемым грунтом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: грунт, уплотнение, вибрация, каток вибрационный, вибровалец, ускорение, фильтрация цифровая, динамический модуль деформации, установившийся режим, переходный режим.

БЛАГОДАРНОСТИ. Авторы выражают благодарность директору ООО «Завод «Дорожных машин» П.А. Кузнецову и главному конструктору ООО «Завод «Дорожных машин» М.А. Шанову за помощь в организации и проведении экспериментальных исследований, а также рецензентам.

Поступила 07.04.2020, принята к публикации 24.04.2020.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

© Тюремнов И.С., Иванов С.Н., Краюшкин А.С.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Тюремнов И.С., Иванов С.Н., Крайушкин А.С. Результаты экспериментальных исследований ускорений колебаний виброролца катка DM-617 с использованием технологии цифровой обработки сигнала. Вестник СибАДИ. 2020; 17 (2): 182-195. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-182-195>

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-182-195>

RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES OF ACCELERATIONS OF THE DM-617 VIBRATORY ROLLER USING DIGITAL SIGNAL PROCESSING TECHNOLOGY

Ivan S. Tiuremnov, Sergey N. Ivanov, Arseniy S. Kraiushkin
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
"Yaroslavl State Technical University",
Yaroslavl, Russia

ABSTRACT

Introduction. To improve the vibrating rollers in order to increase sealing capacity, reliability and vibration safety, the interaction of vibrating roller parts between each other and with compacted soil is simulated mathematically. The developed models are validated, i.e. compared with the results of experimental studies. However, the known results of experimental studies were obtained based on a relatively small list of vibrating roller models and soil types, as well as in a steady vibration mode. The paper presents the results of experimental studies, which used a vibratory drum of a roller to study its vertical vibration accelerations both in the steady vibration, as well as transient mode at turning the vibration generator on (speedup) and off (halt). This expands the range of opportunities to validate the existing and newly developed mathematical models.

Materials and methods. Experimental studies of vertical vibration accelerations of a drum were conducted using the DM-617 vibrating roller when compacting natural sand-gravel aggregate. The accelerometer readings show high-frequency harmonics, which makes it significantly more difficult to determine amplitude values of vibration accelerations, therefore a low-frequency filter with a boundary frequency of 200 Hz was used for digital processing.

Results. It was determined that when the DM-617 vibrating roller is compacting soil with maximum driving force within the range of variation of dynamic modulus of soil deformation $E_{vd} = 14 \dots 25$ MPa, amplitude values of vertical vibration accelerations of the vibratory drum are from 65... 77 to -61... -69 m/s². At the start-up (speedup) of vibration generator, acceleration amplitudes are 1.1 times higher than vertical accelerations of steady operation mode of the vibrating drum and practically do not depend on the dynamic modulus of soil deformation E_{vd} . At turning off (stop) of the vibration generator, amplitude of vertical accelerations do not exceed the vertical accelerations of the steady operation mode of the vibratory drum.

Discussion and conclusion. The vertical acceleration amplitudes of vibratory drums of DM-617 do not depend on the dynamic soil deformation modulus E_{vd} , and this is consistent with the results of experimental studies of the vibratory drum mounted on DM-614. The obtained vertical vibration accelerations of the drum mounted on DM-617 in the steady vibration mode, as well as at switching the vibration generator on (speedup) and off (halt) make it possible to verify the existing and developed mathematical models of interaction of vibrating rollers with compacted soil.

KEYWORDS: soil, compaction, vibration, vibrating roller, vibratory drum, acceleration, digital filtering, dynamic deformation modulus, steady mode, transient mode.

ACKNOWLEDGMENTS. The authors express their gratitude to P.A. Kuznetsov, the Director of the OOO Road Machinery Plant, and to M.A. Shanov, the chief designer of the OOO Road Machinery Plant, for their assistance in organizing and conducting the experimental research, and the reviewers as well.

Submitted 07.04.20120, revised 24.04.2020.

The 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: Tiuremnov I.S., Ivanov S.N., Kraiushkin A.S. Results of experimental studies of accelerations of the DM-617 vibratory roller using digital signal processing technology. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17 (2): 182-195. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-182-195>

© Tiuremnov I.S., Ivanov S.N., Kraiushkin A.S.



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

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на многолетний опыт производства и эксплуатации грунтовых вибрационных катков до настоящего времени большинство производителей этих машин, включая и ведущих мировых, не предоставляют достаточных рекомендаций по обоснованию выбора модели вибрационного катка для выполнения работ в заданных технологических условиях (характеризующихся сочетанием вида грунта, его влажности, толщиной слоя, исходным и требуемым коэффициентом уплотнения) и назначению режимов работы (частоты колебаний, вынуждающего усилия, момента включения и выключения вибрации, скорости движения и требуемого числа проходов) для выполнения работ в заданных технологических условиях^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7} [1, 2]. Это связано с отсутствием методики расчета влияния характеристик и режимов работы вибрационного катка на результаты изменения напряженно-деформированного состояния грунта на различных глубинах при уплотнении грунта в слое заданной толщины или в полупространстве [3, 4].

Анализ подходов, используемых различными авторами для разработки математических моделей [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11], на основании которых возможно построение вышеописанной методики расчета, показал, что требуемая математическая модель должна описывать и особенности колебаний элементов вибрационного катка в процессе вибрационного нагружения грунта и процессы изменения напряженно-деформированного состояния грунта не только с целью прогнозирования результата воздействия катка, но и с целью учета влияния изменяющихся свойств грунта на характери-

стики колебательных процессов вибрационного катка. С учетом сложности требуемой математической модели, необходимости принятия достаточно большого количества допущений и недостаточной изученности процессов, происходящих на различных глубинах грунта при вибрационном нагружении его поверхности, математическая модель будет требовать обязательной верификации. Верификация математической модели должна производиться на основании сравнения результатов моделирования с результатами экспериментальных исследований, проводимых желательным образом в полевых условиях на серийно выпускаемых моделях катков при уплотнении традиционно используемых дорожно-строительных материалов. В качестве измеряемых характеристик для последующей верификации могут быть использованы как результаты измерения характеристик вибрационного катка (например, перемещений и ускорений вальца катка и рамы катка), так и характеристики уплотняемого грунта (ускорения и деформации грунта на различных глубинах, напряжения на различных глубинах грунта, значения плотности и модуля деформации грунта и др.). Однако известные результаты экспериментальных исследований уплотнения грунта вибрационным катком⁸ [10, 11, 12, 13, 14] содержат, как правило, ограниченные данные по характеристикам катка в режиме установившихся колебаний, не затрагивая переходные режимы при включении и выключении вибрации и прохождении зоны резонанса. К тому же расширение диапазона условий, в которых проводятся экспериментальные исследования (модели используемых вибрационных катков, виды грунтов, толщины слоев и др.) расширяет диапазон возможно-

¹ Ложечко В.П., Шестопалов А.А., Окунев В.И., Окулов Р.Д. Уплотняющие машины: пособие по выбору оборудования для уплотнения грунтов и асфальтобетонных смесей. Рыбинск. Рыбинский дом печати. 2004. 79 с.

² Уплотнение асфальтобетона и грунта // HAMM AG D02 03.2011 212 4832. 2011, 142 с.

³ BOMAG. Soil and Asphalt compaction. 03/04 Art. No WM 9703. URL: https://www.bomag.com/media/editor/WM9703_0403_rdr.pdf (дата обращения: 19.03.2020)

⁴ Caterpillar. Эксплуатационные характеристики // Справочник. Издание 38. Издание Cat® Caterpillar Inc., Пеория, Иллинойс, США. Январь 2008.

⁵ Уплотнение и укладка. Теория и практика // Издание Dynapac Compaction Equipment AB Санкт Петербург. «Рекламное агентство А.М.Г.». 2008. 90 с.

⁶ Грунтовые катки «РАСКАТ» [Электронный ресурс]. URL: <http://oao-raskat.ru/wp-content/uploads/Gruntovue-RV.pdf> (дата обращения: 19.03.2020).

⁷ Atlas Weycor 240-1140 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.weycor.ru/bitrix/images/AW-240.pdf> (дата обращения: 19.03.2020).

⁸ Тюремнов И.С., Морев А.С., Фурманов Д.В. К вопросу обоснования значения присоединённой массы грунта при реологическом моделировании процесса уплотнения грунта вибрационным катком // В сборнике: ПРОБЛЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ. Материалы III Международной научно-технической конференции. Омск, 2019. С. 215–223.

стей для верификации существующих и вновь разрабатываемых математических моделей.

В данной статье приведены результаты экспериментальных исследований ускорений вальца вибрационного катка DM-617 производства «Завод «Дорожных машин»» (г. Рыбинск, Ярославская обл.) при уплотнении грунта в полевых условиях для использования при верификации математических моделей взаимодействия вибрационного катка с уплотняемым грунтом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальные исследования уплотнения грунта вибрационным катком выполнялись летом 2018 г. при строительстве площадки для стоянки грузового транспорта логистического центра ОРЦ «Ярославль» в районе поселка Новосёлки (Ярославский район, Ярославская область).

В исследованиях использовался вибрационный каток DM-617 производства «Завод «Дорожных машин»» с характеристиками: масса катка конструктивная (эксплуатационная) 15.5(16.0) т; распределение массы по осям (передняя ось / задняя ось) 55% / 45%; диаметр вальца 1550 мм; ширина вальца 2000 мм; линейная статическая нагрузка на ось 43,5 кг/см; двигатель Cummins 6BTA5.9-C175 (номинальная мощность 128 кВт; номинальные обороты 2100 об/мин; рабочие обороты 1800 об/мин); частота колебаний вальца 30/30 Гц; номинальная амплитуда колебания вальца 1,15/1,6 мм; центробежная сила вибровозбудителя 170/230 кН; амортизаторы вальца GMT 58200715 (20 шт.).

Уплотняемый грунт (природная песчано-гравийная смесь с содержанием зерен гравия свыше 5 мм – 40,5 % и песка среднего ($M_{кр}=2,24$) – 59,5 % и наибольшей крупностью зерен гравия – 70 мм, стандартная плотность скелета $\rho_{ск}^{ст} = 1750$ кг/м³, оптимальная влажность $W_o = 8,22$ %) отсыпался слоем толщиной 0,5 м (рисунок 1).

Ускорения колебаний вибровальца катка регистрировалось акселерометром со встроенной электроникой модели AP2099-100 производства ООО «Глобал-Тест» (г. Саров)⁹, установленном продольной осью вертикально на вальце катка при помощи кронштейна

(см. рисунок 1). Показания акселерометра регистрировались анализатором спектра ZET 017-U8¹⁰ (производства компании ZETLAB, г. Зеленоград) в реальном времени в процессе уплотнения катком грунта. Частота опроса датчика составляла 5000 Гц.

Уплотнение грунта осуществлялось при движении вибрационного катка вперёд с максимальной вынуждающей силой.

Состояние грунта после каждого двух проходов оценивалось значением динамического модуля деформации E_{vd} , измеряемым при помощи установки динамического нагружения ZORN ZFG 3.0. Измерение значений E_{vd} осуществлялось после окончания прохода в трех точках поперёк направления движения катка (посередине следа, на правой и на левой стороне следа) и затем усреднялось. Каждая серия измерений значений E_{vd} выполнялась со смещением вперёд на 1,5–2 метра, по отношению к участку предыдущих измерений (см. рисунок 1).

Для обеспечения достоверности результатов, экспериментальные исследования выполнены с тремя повторами, на каждом из которых максимально воспроизводились исходные грунтовые и технологические условия.



Рисунок 1 – Участок проведения экспериментальных исследований и место установки акселерометра на вальце катка DM-617

Figure 1 – Experimental research site and place of accelerometer installation on roller of DM-617

⁹ Вибропреобразователь AP2099-100 [Электронный ресурс]. URL: <https://globaltest.ru/product/vibropreobrazovatel-ap2099-100/> (дата обращения: 19.03.2020).

¹⁰ Анализатор спектра ZET 017-U8 [Электронный ресурс]. URL: <https://zetlab.com/shop/izmeritelnoe-oborudovanie-analizatory/analizator-spektra-zet017-u8/> (дата обращения: 19.03.2020).

На рисунке 2 представлена характерная экспериментальная осциллограмма ускорений колебаний вибровальца катка DM-617, зарегистрированная в процессе уплотнения грунта.

На диаграмме (см. рисунок 2) присутствуют характерные зоны:

- стоянка катка с работающим двигателем (интервал времени от 0 до 4 с);
- движение катка без вибрации (интервал времени от 4 до 15 с);
- включение вибровозбудителя и его разгон до номинальной частоты вращения (интервал времени от 15 до 18 с);
- движение катка вперёд с включенной вибрацией (интервал времени от 18 до 92 с);
- выключение вибрации и останов вибровозбудителя (интервал времени от 92 до 95 с);
- движение катка вперёд без вибрации (интервал времени от 95 с).

При анализе представленной осциллограммы (см. рисунок 2) обращает на себя внимание кратковременное увеличение значений ускорений колебаний при включении вибрации (в районе 16–17 с, по шкале времени на рисунке 2) и при выключении вибрации (в районе 92 с, по шкале времени на рисунке 2).

При определении амплитудных значений виброускорений вальца по огибающей осциллограммы виброускорений получаются следующие результаты:

- при включении вибровозбудителя и его разгоне до номинальной частоты вращения амплитудное максимальное и минимальное значение ускорений колебаний составляет, соответственно, $+140 \text{ м/с}^2$ и -120 м/с^2 ;

- при движении катка вперёд с включенной вибрацией амплитудное максимальное и минимальное значение ускорений колебаний составляет, соответственно, $+100 \dots +120 \text{ м/с}^2$ и $-85 \dots -100 \text{ м/с}^2$;

- при выключении вибровозбудителя и его останове амплитудное максимальное и минимальное значение ускорений колебаний составляет, соответственно, $+95 \text{ м/с}^2$ и -110 м/с^2 .

Однако более подробное рассмотрение осциллограммы ускорений вальца, например на участке установившейся вибрации, показывает, что в сигнале присутствуют высокочастотные составляющие, размах которых может превышать 40 м/с^2 (рисунок 3). Данные особенности существенно усложняют определение действительных численных значений ускорений колебаний вибровальца.

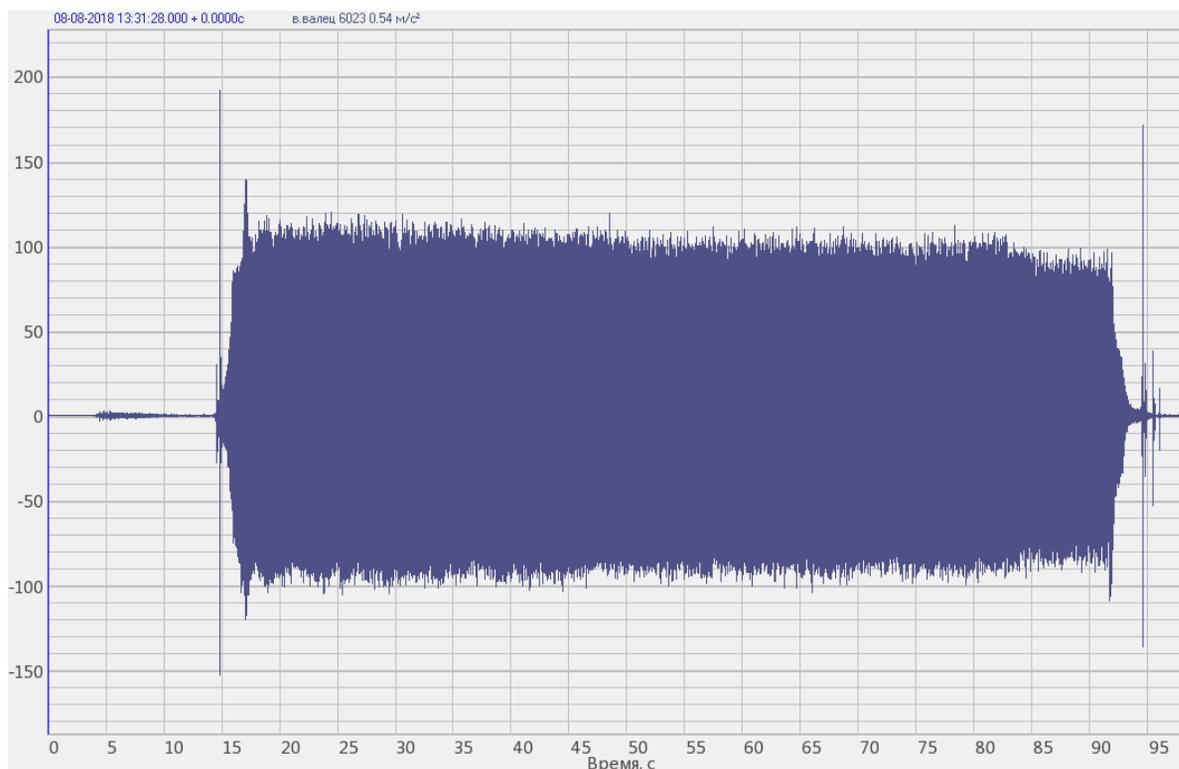


Рисунок 2 – Экспериментальная осциллограмма ускорений колебаний вибровальца катка DM-617

Figure 2 – Experimental oscillograph trace of vibrating rolls DM-617

Спектральный анализ, проведенный с помощью инструмента «Узкополосный спектр», входящего в пакет «Анализ сигналов» программного обеспечения ZETLAB к анализатору спектра ZET 017-U8 показал, что в сигнале датчика ускорения колебаний присутствуют гармоники на частотах:

- 31, 62, 282, 400, 436, 1751 Гц (при включении вибровозбудителя и его разгоне до номинальной частоты вращения);

- 30, 60, 287, 390, 421, 631, 1262, 1473, 1683 и 1893 Гц (при движении катка вперед с включенной вибрацией);

- 20, 30, 390, 1689 Гц (при выключении вибровозбудителя и его останове).

В составе вибрационного катка источником механических колебаний является вибровозбудитель вальца и двигатель. В технических характеристиках вибрационного катка DM-617 указывается, что номинальная частота колебаний вальца составляет 30 Гц, а частота вращения коленчатого вала двигателя равна 35 Гц на номинальных оборотах (2100 об/мин) и 30 Гц на рабочих оборотах (1800 об/мин). Анализ исследований колебаний вибровальца катка [15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22] позволяет сделать вывод, что при уплотнении различных дорожно-строительных материалов в спектре ускорений колебаний вальца могут присутствовать гармоники и субгармоники на частотах до $3,5f \dots 5f$, где f – частота колебаний

вибровозбудителя катка. Применительно к вибрационному катку DM-617 это соответствует диапазону частот до 150 Гц. Следовательно, колебания с частотой свыше 150...200 Гц не могут быть вызваны особенностями колебаний вибровальца.

Источниками механических высокочастотных колебаний в вибрационном катке могут являться агрегаты гидросистемы и двигателя, приводимые во вращение от коленчатого вала, а также подшипники. Возможны и электрические причины высокочастотных колебаний в регистрируемом сигнале с датчика ускорений, вызываемые наводками от работающих элементов электрооборудования катка, недостаточной экранировкой датчика, проводов датчика, регистрирующего оборудования и др.

Таким образом, при анализе виброускорения вальца катка представляет интерес диапазон частот 0...200 Гц. Частоты, превышающие 200 Гц, вызываются процессами, не имеющими отношения к механическим колебаниям вибровальца и могут быть исключены из рассмотрения, что позволяет использовать для обработки сигнала фильтр низких частот с граничной частотой 200 Гц, подавляющий в сигнале все гармоники с частотой, превышающей 200 Гц.

На рисунке 4 приведен пример результатов обработки исходного сигнала датчика виброускорений (верхняя осциллограмма на рисунке 4) с использованием фильтров низкой ча-

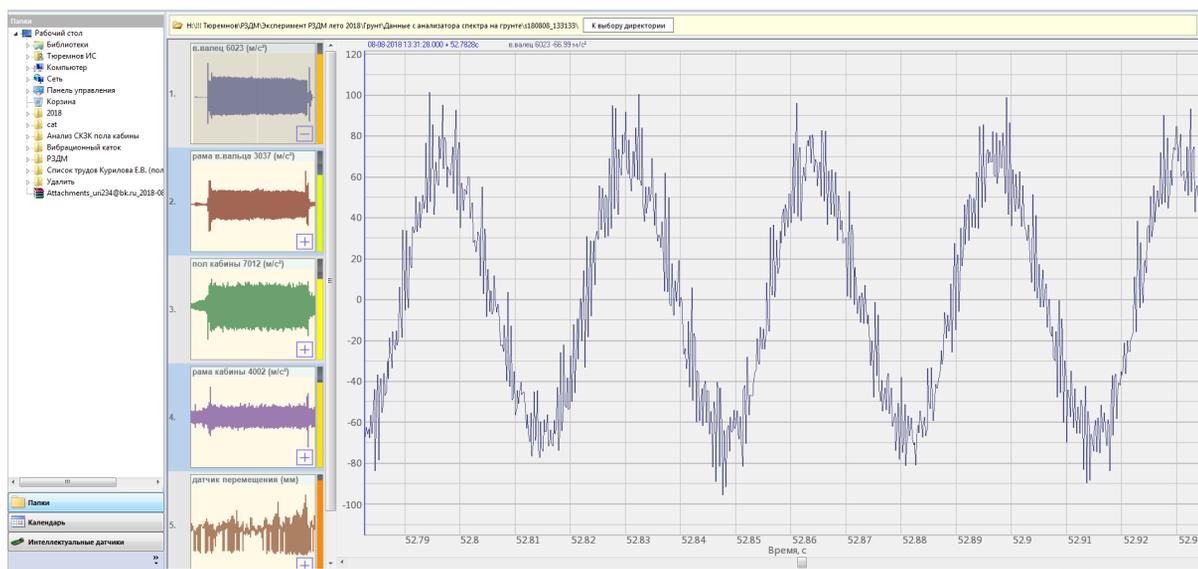


Рисунок 3 – Высокочастотные составляющие в экспериментальной осциллограмме ускорений колебаний вибровальца катка DM-617

Figure 3 – High-frequency components in experimental oscillogram trace of vibrating rolls DM-617

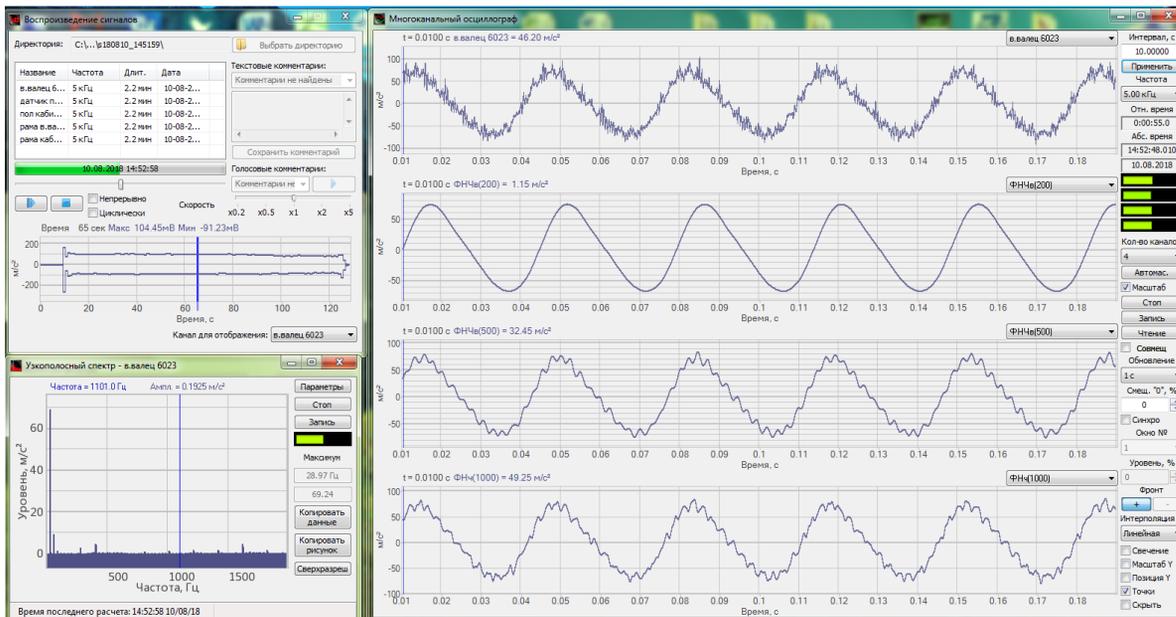


Рисунок 4 – Результаты цифровой обработки исходного сигнала датчика виброускорений (верхняя осциллограмма) с использованием фильтров низкой частоты с граничной частотой 1000 Гц, 500 Гц и 200 Гц

Figure 4 – Results of digital processing initial signal of the vibration acceleration sensor (upper oscillograph trace) using low frequency filters with a boundary frequency of 1000 Hz, 500 Hz and 200 Hz.

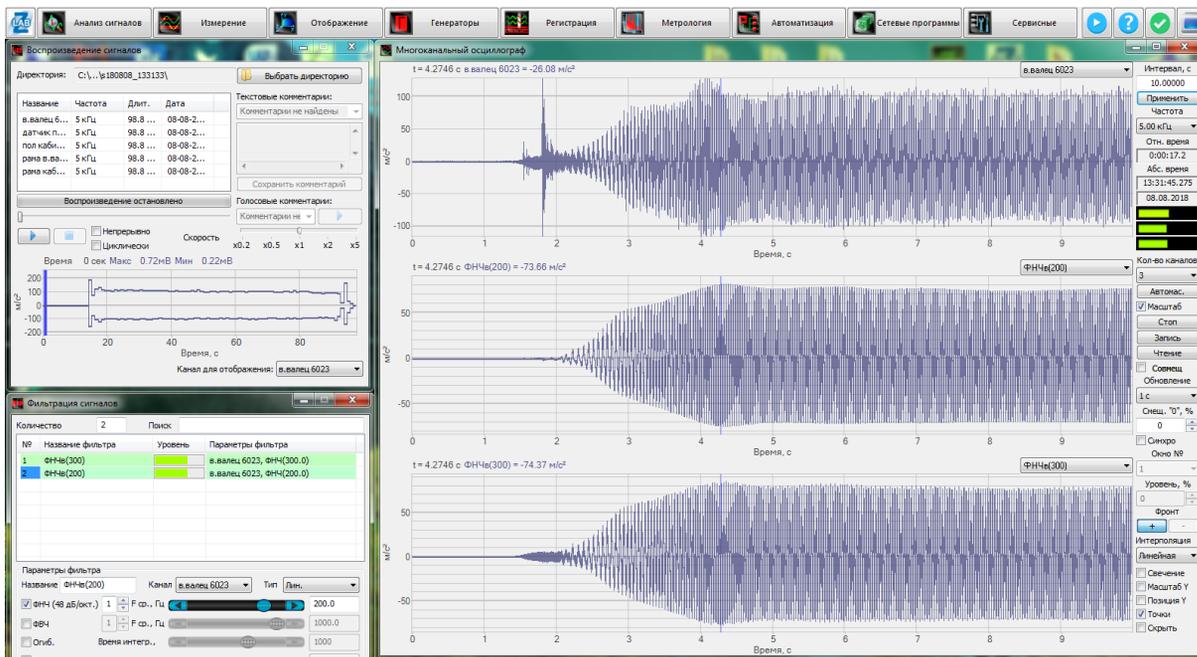


Рисунок 5 – Результаты применения фильтра низких частот с граничной частотой 200 Гц к обработке сигнала ускорений для этапа включения вибрации и разгона вибровозбудителя

Figure 5 – Results of application of low-pass filter with boundary frequency of 200 Hz to acceleration signal processing for the stage of vibration actuation and speedup of vibration exciter

стоты с граничной частотой 1000 Гц (нижняя осциллограмма), 500 Гц и 200 Гц. Цифровая фильтрация осуществлялась с использованием инструмента «Формула» из пакета «Автоматизация» программного обеспечения ZETLAB к анализатору спектра ZET 017-U8. Окно воспроизведения сигнала ускорений и спектр ускорений для режима установившихся колебаний вальца также приведены в левой части рабочего окна обработки сигналов (см. рисунок 4). При использовании цифровой фильтрации амплитудные значения ускорений оказываются существенно меньше, чем в исходном сигнале.

Результаты применения фильтра низких частот с граничной частотой 200 Гц к обработке сигнала ускорений (см. рисунки 2, 3) для этапа включения вибрации и разгона вибровозбудителя (рисунок 5) и для этапа выключения вибрации и останова вибровозбудителя (рисунок 6) также показывают существенное уменьшение значений ускорений колебаний вальца по сравнению с исходным сигналом (см. рисунок 2).

Применение цифровой обработки сигнала датчика ускорений с использованием фильтра низкой частоты с граничной частотой 200 Гц обеспечивает подавление всех высокочастот-

ных составляющих обрабатываемого сигнала, не содержащих полезную информацию об особенностях колебаний вальца катка. Поэтому в дальнейшем для получения численных значений ускорений колебаний вибровальца катка использовалась цифровая фильтрация сигнала датчика ускорений с граничной частотой 200 Гц.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты измерений вертикальных ускорений вибровальца катка DM-617 при уплотнении грунта с использованием фильтра низкой частоты с граничной частотой 200 Гц приведены на рисунках 7, 8, 9.

Обработка результатов измерений вертикальных ускорений вибровальца катка DM-617 при уплотнении грунта (с учетом трехкратной повторности) показала:

1. В исследованном диапазоне значений динамического модуля деформации грунта $E_{vd}=14...25$ МПа, при работе с максимальным вынуждающим усилием, амплитудные значения вертикальных ускорений вибровальца находятся в среднем в диапазоне от +65...+77 до -61...-69 м/с². При этом отсутствует корреляция между значением E_{vd} и амплитудными значениями вертикальных ускорений вибровальца.

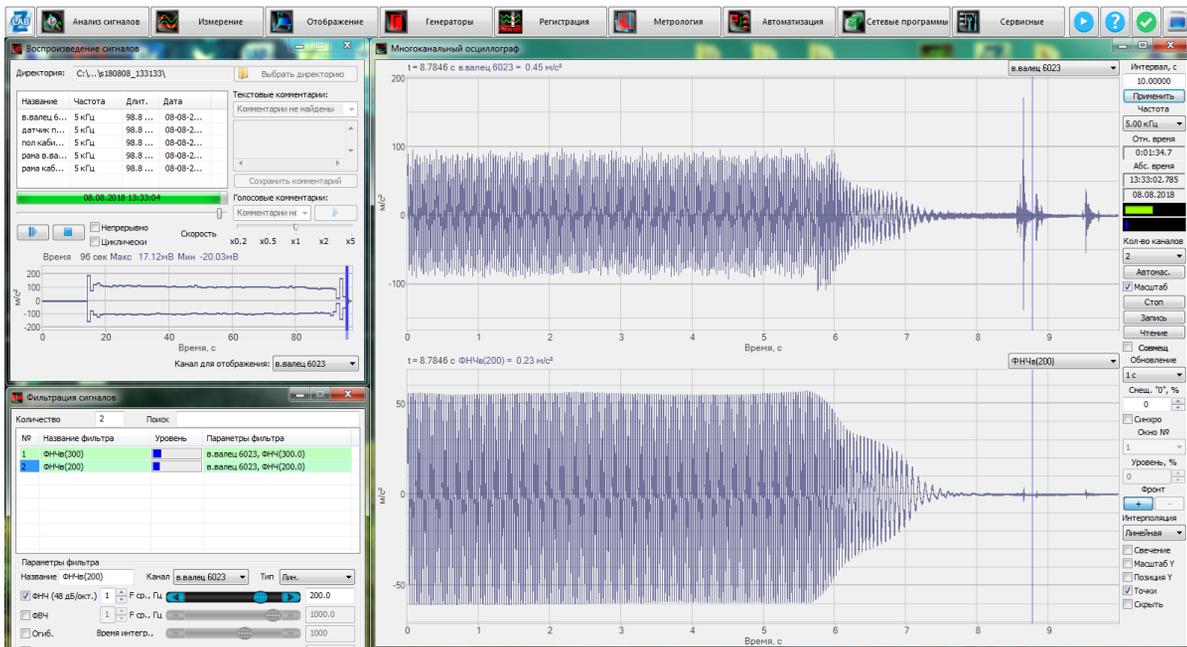


Рисунок 6 – Результаты применения фильтра низких частот с граничной частотой 200 Гц к обработке сигнала ускорений для этапа выключения вибрации и останова вибровозбудителя

Figure 6 – Results of application of low-pass filter with boundary frequency of 200 Hz to acceleration signal processing for the stage of vibration cutting-off and halt vibration exciter

2. В исследованном диапазоне значений динамического модуля деформации грунта $E_{vd}=14...25$ МПа, при работе с максимальным вынуждающим усилием, при включении вибрации и разгоне вибровозбудителя значения вертикальных ускорений вибровальца нахо-

дятся в среднем в диапазоне от $+72...+84$ до $-66...-74$ m/s^2 , что в 1,1 раза превышает значения вертикальных ускорений установившегося режима работы вибровальца и практически не зависят от значения динамического модуля деформации грунта E_{vd} .

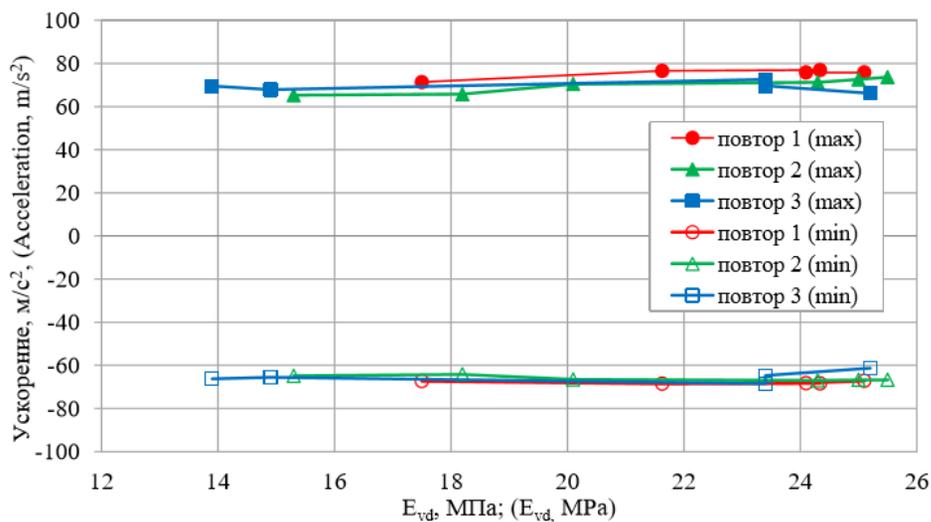


Рисунок 7 – Результаты обработки осциллограмм вертикальных ускорений вибровальца в процессе установившейся вибрации при уплотнении грунта вибрационным катком DM-617 (движение вперед с максимальной вибрацией)

Figure 7 – Results of processing of oscillograms of vertical accelerations of the vibrating rolls during steady-state vibration during soil compaction by the vibration roller DM-617 (forward motion with maximum vibration)

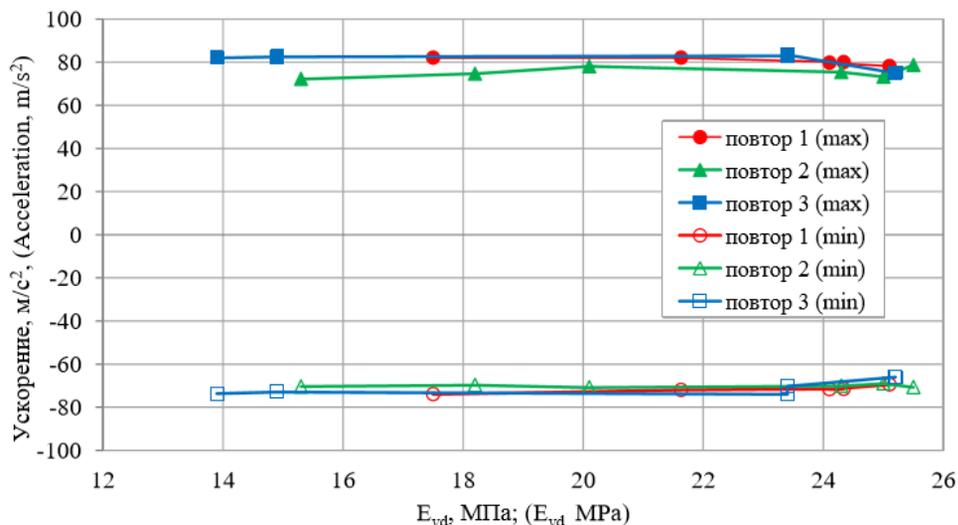


Рисунок 8 – Результаты обработки осциллограмм вертикальных ускорений вибровальца при включении вибрации и разгоне вибровозбудителя в процессе уплотнения грунта вибрационным катком DM-617 (движение вперед с максимальной вибрацией)

Figure 8 – Results of processing of oscillograms of vertical accelerations of vibrating rolls at actuation of vibration and speed-up of vibration exciter during soil compaction by vibration roller DM-617 (forward motion with maximum vibration)

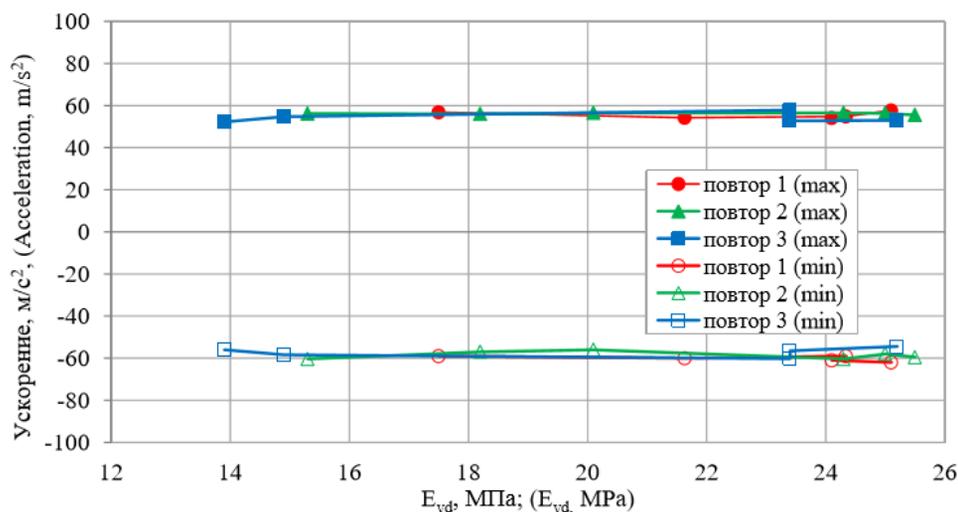


Рисунок 9 – Результаты обработки осциллограмм вертикальных ускорений вибровальца при выключении вибрации и останове вибровозбудителя в процессе уплотнения грунта вибрационным катком DM-617 (движение вперед с максимальной вибрацией)

Figure 9 – Results of processing of oscillograms of vertical accelerations of vibration shaft when vibration and vibration exciter are switched off during soil compaction by vibration roller DM-617 (forward motion with maximum vibration)

3. В исследованном диапазоне значений динамического модуля деформации грунта $E_{vd}=14\dots 25$ МПа, при работе с максимальным вынуждающем усилием при выключении вибрации и останове вибровозбудителя значения вертикальных ускорений вибровальца находятся в среднем в диапазоне от $+52\dots +54$ до $-54\dots -62$ м/с², что не превышает значений вертикальных ускорений установившегося режима работы вибровальца.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение предварительной цифровой обработки (фильтрации) сигнала акселерометра при анализе ускорений колебаний вибрационного катка DM-617 в процессе уплотнения грунта позволило исключить из сигнала высокочастотные гармоники, не связанные с механическими особенностями колебаний вибрационного вальца. Это обеспечивает повышение точности определения характера изменений во времени и амплитудных значений ускорений колебаний вальца вибрационного катка, что важно при верификации математических моделей. Причем полученные экспери-

ментальные данные позволяют осуществлять верификацию математических моделей не только для установившегося режима колебаний, но и при переходных процессах, имеющих место при включении и выключении вибрации.

Выявленная независимость амплитудных значений вертикальных ускорений вибровальца от значения динамического модуля деформации грунта в исследованном диапазоне ($E_{vd}=14\dots 25$ МПа) не вполне соответствует интуитивным представлениям о влиянии возрастающей плотности и жесткости грунта в процессе уплотнения на изменение характера колебаний вибровальца катка. Однако полученные результаты хорошо коррелируют с результатами экспериментальных исследований колебаний вибровальца катка DM-614, проводимыми авторами в 2015 г.¹¹ [21], также показавшими независимость амплитудных значений ускорений вибровальца катка DM-614 от значений динамического модуля деформации грунта в диапазоне $E_{vd}=7\dots 15$ МПа. Полученный при экспериментальных исследованиях с вибрационным катком DM-614 диапазон изменений амплитудных значений ускорений колебаний вибровальца (от $+54\dots +56$ до $-54\dots -56$

¹¹ Тюремнов И.С., Морев А.С., Фурманов Д.В. К вопросу обоснования значения присоединённой массы грунта при реологическом моделировании процесса уплотнения грунта вибрационным катком // В сборнике: ПРОБЛЕМЫ МАШИНОВЕДЕНИЯ. Материалы III Международной научно-технической конференции. Омск, 2019. С. 215–223.

м/с²) близок к диапазону зарегистрированных амплитудных значений ускорений вибровальца катка DM-617 (от +65...+77 до -61...-69 м/с²), представленному в данной работе с учетом различия в массе и вынуждающем усилии вибрационных катков (соответственно, 16 тонн и 230 кН у катка DM-617; 14 тонн и 215 кН у катка DM-614).

Следует также отметить, что в системах непрерывного контроля уплотнения грунта вибрационными катками в качестве критерия оценки не используется амплитудное значение ускорений колебаний вальца. Применяются показатели, основанные на амплитудных значениях гармоник спектра ускорений вальца в диапазоне от $0,5f$ до $3f$ (где f – частота колебаний вибровальца катка или базовая частота) [15, 16, 17, 18, 19, 20]. Это подтверждает обоснованность ограничения диапазона частот при использовании фильтра низкой частоты значениями $0...200$ Гц (или $(0...6,5)$ f). Также это свидетельствует об отсутствии корреляции значений динамического модуля деформации грунта с амплитудным значением ускорений колебаний вальца, т.к. в противном случае в системах непрерывного контроля уплотнения грунта вибрационными катками использовался бы более простой для измерения показатель амплитудных значений ускорений колебаний вальца катка вместо показателей, основанных на обработке спектра ускорений колебаний вальца [22].

Таким образом, представленные в статье результаты экспериментальных исследований колебаний вибровальца катка DM-617 позволяют осуществлять верификацию математических моделей взаимодействия элементов вибрационного катка с учетом свойств уплотняемого грунта, имеющих важное значение при проектировании конструкций вибрационных катков, исследовании проблем вибробезопасности катков и повышения эффективности уплотнения грунтов вибрационными катками. Достоверность полученных результатов обеспечивается трех-кратным повтором эксперимента и хорошей воспроизводимостью амплитудных значений зарегистрированных ускорений при различных повторях, а также сравнением полученных данных с результатами ранее выполненных экспериментальных исследований и сопоставлением с существующими сведениями о принципах функционирования систем непрерывного контроля уплотнения грунтов вибрационными катками.

Полученные данные дополняют имеющиеся сведения о результатах экспериментальных исследований уплотнения грунтов вибрационными катками, в том числе в области переходных режимов при включении и выключении вибрации и прохождении зоны резонанса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тюремнов И. С., Филатов И. С., Игнатъев А. А. Обзор рекомендаций производителей по использованию вибрационных катков для уплотнения грунта // Вестник ТОГУ. 2014. № 2(33). С. 155–162.
2. Тюремнов И.С., Батраков Д.С. Особенности определения технологических возможностей вибрационных катков // Информационные технологии. Проблемы и решения. Материалы Международной научно-практической конференции. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2018. Том 1(5). С. 140–146.
3. Тюремнов И.С., Чабуткин Е.К., Игнатъев А.А. Повышение эффективности применения технических средств для уплотнения дорожно-строительных материалов // Строительные и дорожные машины. 2009. № 11. С. 9–11.
4. Тюремнов И.С., Игнатъев А.А. Уплотнение грунтов вибрационными катками: монография. Ярославль: Изд-во ЯГТУ. 2012. 140 с.
5. Попов Г.Н. Выбор параметров прицепных вибрационных катков для уплотнения грунтов оснований // Труды Ленинградского политехнического института. Л.: Машиностроение. 1972, выпуск 327. С. 114–119.
6. Yoo T-S., Selig E.T. Dynamics of Vibratory-Roller Compaction // Journal of the Geotechnical Engineering Division. 1979. 105 (10). pp. 1211–1231.
7. Siminiati D., Hren D. Simulation on vibratory roller-soil interaction // J. Adv. Eng. 2008. №2. pp. 111–120.
8. Anderegg R., Dominik A von Felten., Kaufmann K. Compaction Monitoring Using Intelligent Soil Compactors // Proceedings of GeoCongress: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age. 2006. pp. 41–46. URL: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40803%28187%2941> (дата обращения: 19.03.2020)
9. 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.
10. Van Susante P.J., Mooney M.A. Capturing Nonlinear Vibratory Roller Compactor Behavior through Lumped Parameter Modeling // Journal of engineering mechanics. 2008. 134. pp. 684–693.
11. Shen P.H. Dynamic characteristics of the intelligent compactor model with adjustable vibration modes // International Conference on Transportation Engineering (ICTE 2009). 2009. pp. 2322–2327. URL: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/41039%28345%29384> (дата обращения: 19.03.2020)

12. Facas N.W., van Susante P.J., Mooney M.A. Influence of rocking motion on vibratory roller-based measurement of soil stiffness // *Journal of engineering mechanics* (American Society of Civil Engineers). 2010. 136 (7). pp. 898–905.

13. Pietzsch D., Poppy W. Simulation of soil compaction with vibratory rollers // *Journal of Terramechanics* 1992. 29 (6). pp. 585–597. URL:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S002248989290038L?via%3Dihub> (дата обращения: 19.03.2020).

14. Савельев С.В., Бурый Г.Г. Экспериментальные исследования «активной области» деформируемой среды при вибрационном уплотнении // *Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии*. 2012. № 5 (27). С. 88–94.

15. Mooney M., Adam D. Vibratory Roller Integrated Measurement of Earthwork: An Overview // *Seventh International Symposium on Field Measurements in Geomechanics*. Boston, Massachusetts, 2007. pp. 12 URL: https://www.researchgate.net/publication/268591165_Vibratory_Roller_Integrated_Measurement_of_Earthwork_Compaction_An_Overview (дата обращения: 23.03.2020).

16. Thurner H. Continuous Compaction Control, CCC/ Thurner H., Sandstrom A. // *European Workshop Compaction of Soils and Granular Materials*. Presses Ponts et Chaussées, Paris, France, 2000. pp. 237–246.

17. Pavana K.R. Vennapusa, David J. White, Max D. Morris Geostatistical Analysis for Spatially Referenced Roller-Integrated Compaction Measurements // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2010. pp. 813–822.

18. David J. White. A., Pavana K. R. Vennapusa review of roller-integrated compaction monitoring technologies for earthworks // *Final Report ER10-04*. URL: <https://manualzz.com/doc/8939724/a-review-of-roller-integrated-compaction-technologies-for> (assessed: 23.03.2020).

19. George K. Chang, Qinwu Xu, Rob Rasmussen, David Merritt, Larry Michael, David White, Bob Horan. Accelerated Implementation of Intelligent Compaction Technology For Embankment Subgrade Soils, Aggregate Base, and Asphalt Pavement Materials // *IC Data Management, Federal Highway Administration Office of Pavement Technology*. 2010. pp. 118 URL: http://www.intelligentcompaction.com/downloads/Reports/FHWA-TPF_IC_Final_Report.pdf (дата обращения: 23.03.2020).

20. Scherocman J., S. Rakowski, K. Uchiyama Intelligent. Compaction, does it exist? // *Canadian Technical Asphalt Association (CTAA) Conference, Victoria, BC*. 2007. URL: http://www.intelligentcompaction.com/downloads/PapersReports/Saikai_Jim%20Sherocman_IC%20Does%20it%20Exist_CTAA_2007.pdf (дата обращения: 23.03.2020).

21. Тюремнов И. С., Морев А. С. Системы непрерывного контроля уплотнения грунта вибрационными катками: монография. Изд-во ЯГТУ, Ярославль. 2019. 172 с.

22. Тюремнов И. С., Морев А. С. Обзор систем непрерывного контроля уплотнения грунта для вибрационных катков. Часть 1 // *Вестник ТОГУ*. 2015. № 4(39). С. 99–108.

REFERENCES

1. Tjurementov I. S., Filatov I. S., Ignat'ev A. A. Обзор рекомендаций производителей по использованию вибрационных катков для уплотнения грунта [Review of Manufactureres' Recommendations on the Use of Vibrating Rollers for the Soil Compaction]. *Vestnik TOGU*. 2014; 2(33):155–162 (in Russian).

2. Tjurementov I.S., Batrakov D.S. Osobennosti opredelenija tehnologicheskikh vozmozhnostej vibracionnyh katrov [Features of the determination of the technological possibilities of vibratory rollers]. *Informacionnye tehnologii. Problemy i reshenija. Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii*. Ufa: Izd-vo UGNTU, 2018; 1(5): 140–146 (in Russian).

3. Tjurementov I.S., Chabutkin E.K., Ignat'ev A.A. Povyshenie jeffektivnosti primenenija tehniceskikh sredstv dlja uplotnenija dorozhno-stroitel'nyh materialov [Improving the efficiency of the use of technical means for compaction of road-building materials]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2009; 11: 9–11 (in Russian).

4. Tjurementov I.S., Ignat'ev A.A. *Uplotnenie gruntov vibracionnymi katkami: monografija*. Jaroslavl': Izd-vo JaGTU [Soil compaction by vibration rollers: monograph]. 2012: 140 (in Russian).

5. Popov G.N. Vybor parametrov pricepnyh vibracionnyh katrov dlja uplotnenija gruntovyh osnovanij [Selection of parameters of towed vibration rollers for soil bases compaction]. *Trudy Leningradskogo politehnicheskogo instituta*. Leningrad: Mashinostroenie: 1974; 327: 114–119 (in Russian).

6. Yoo T-S., Selig E.T. Dynamics of Vibratory-Roller Compaction. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. 1979; 105 (10): 1211–1231.

7. Siminiati D., Hren D. Simulation on vibratory roller-soil interaction. *J. Adv. Eng*. 2008; 2: 111–120.

8. Anderegg R., Dominik A von Felten., Kaufmann K. Compaction Monitoring Using Intelligent Soil Compactors. *Proceedings of GeoCongress: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age*. 2006: 41–46. Available at: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40803%28187%2941> (accessed 19.03.2020).

9. Shabanova G.I., Savel'ev S.V., Buryj G.G. Matematicheskoe opisanie kolebatel'noj sistemy «vibracionnyj rabochij organ – grunt» [Mathematical description of the oscillating system “vibrating working body – the ground”]. *Vestnik SibADI*. 2013; 3 (31):102–107 (in Russian).

10. Van Susante P.J., Mooney M.A. Capturing Nonlinear Vibratory Roller Compactor Behavior through Lumped Parameter Modeling. *Journal of engineering mechanics*. 2008;134: 684–693.

11. Shen P.H. Dynamic characteristics of the intelligent compactor model with adjustable

vibration modes. *International Conference on Transportation Engineering (ICTE 2009)*. 2009: 2322–2327. Available at: <https://ascellibrary.org/doi/10.1061/41039%28345%29384> (accessed 19.03.2020).

12. Facas N.W., van Susante P.J., Mooney M.A. Influence of rocking motion on vibratory roller-based measurement of soil stiffness. *Journal of engineering mechanics (American Society of Civil Engineers)*. 2010; 136 (7): 898–905.

13. Pietzsch D., Poppy W. Simulation of soil compaction with vibratory rollers. *Journal of Terramechanics*. 1992; 29 (6): 585–597. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/002248989290038L?via%3Dihub>. (accessed 19.03.2020)

14. Savel'ev S.V., Buryj G.G. Jeksperimental'nye issledovaniya «aktivnoj oblasti» deformiruemoj sredy pri vibracionnom uplotnenii [Experimental researches of «Active area» of the deformable medium at vibrating consolidation]. *Vestnik SibADI*. 2012; 5 (27): 88–94 (in Russian).

15. Mooney M., D. Adam Vibratory Roller Integrated Measurement of Earthwork: An Overview. *Seventh International Symposium on Field Measurements in Geomechanics*. Boston, Massachusetts, 2007: 12. Available at: https://www.researchgate.net/publication/268591165_Vibratory_Roller_Integrated_Measurement_of_Earthwork_Compaction_An_Overview (accessed 23.03.2020).

16. Thurner H. Continuous Compaction Control, CCC/ Thurner H., Sandstrom A. *European Workshop Compaction of Soils and Granular Materials*. Presses Pons et Chaussées, Paris, France, 2000: 237–246.

17. Geostatistical Analysis for Spatially Referenced Roller-Integrated Compaction Measurements/ Pavana K. R. Vennapusa, David J. White, Max D. Morris. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2010: 813–822.

18. David J. White., Pavana K. R. Vennapusa A review of roller-integrated compaction monitoring technologies for earthworks. *Final Report ER10-04* [Electronic resource] Available at: <https://manualzz.com/doc/8939724/a-review-of-roller-integrated-compaction-technologies-for> (accessed 23.03.2020).

19. George K. Chang, Qinwu Xu, Rob Rasmussen, David Merritt, Larry Michael, David White, Bob Horan. Accelerated Implementation of Intelligent Compaction Technology For Embankment Subgrade Soils, Aggregate Base, and Asphalt Pavement Materials. *IC Data Management, Federal Highway Administration Office of Pavement Technology*. 2010: 118 [Electronic resource]. Available at: http://www.intelligentcompaction.com/downloads/Reports/FHWA-TPF_IC_Final_Report.pdf (accessed 23.03.2020).

20. Scherocman J., Rakowski S., Uchiyama K. Intelligent. Compaction, does it exist? *Canadian Technical Asphalt Association (CTAA) Conference*, Victoria, BC. 2007. Available at: http://www.intelligentcompaction.com/downloads/PapersReports/Saikai_Jim%20Scherocman_IC%20Does%20it%20Exist_CTAA_2007.pdf (accessed 23.03.2020).

21. Tjurementnov I. S., Morev A. S. *Sistemy nepreryvnogo kontrolja uplotnenija grunta vibracionnymi katkami: monografija* [Systems for continuous monitoring of soil compaction by vibration rollers]. Izd-vo JaGTU, Jaroslavl'. 2019: 172 (in Russian).

22. Tjurementnov I. S., Morev A. S. Obzor sistem nepreryvnogo kontrolja uplotnenija grunta dlja vibracionnyh katkov. Chast' 1 [The review of the continuous compaction control systems for soil compaction by vibratory rollers. part 1]. *Vestnik TOGU*. 2015; 4(39): 99–108 (in Russian).

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Тюрментнов Иван Сергеевич – общая организация работы авторского коллектива, формулирование цели и задач исследования, разработка методики проведения исследования, организация и проведение экспериментальных исследований, написание текста статьи.

Иванов Сергей Николаевич – обработка экспериментальных данных, подготовка материала для статьи.

Краюшкин Арсений Сергеевич – обработка экспериментальных данных, подготовка материала для статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Ivan S. Tiurementnov – general organization of work of the corporate author, formulation of the purpose and objectives of the study, formulation of the purpose and objectives of the research, organization and testing the experimental research, writing of the text of the article.

Sergey N. Ivanov – processing experimental data, preparing material for the article.

Arseniy S. Kraiushkin – processing experimental data, preparing material for the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тюрментнов Иван Сергеевич – канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Строительные и дорожные машины», ORCID 0000-0003-2261-4153, ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет» (150023 г. Ярославль, Московский пр., 88, e-mail: tyumentnovis@yandex.ru).

Иванов Сергей Николаевич – студент кафедры «Строительные и дорожные машины», ФГБОУ ВО Ярославский государственный технический университет» (150023 г. Ярославль, Московский пр., 88, e-mail: sereska65@mail.ru).

Краюшкин Арсений Сергеевич – студент кафедры «Строительные и дорожные машины», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет» (150023 г. Ярославль, Московский пр., 88, e-mail: senya1257@gmail.com).

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Ivan S. Tiuremnov – Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, the Head of the Department of Construction and Road Machines, ORCID 0000-0003-2261-4153, Yaroslavl State Technical University (150023, Russia, Yaroslavl, Moskovskii Prospect 88, e-mail: tyuremnovis@yandex.ru).

Sergey N. Ivanov – student of the department of Construction and Road Machines, Yaroslavl State Technical University. (150023, Russia, Yaroslavl, Moskovskii Prospect 88, e-mail: sereska65@mail.ru).

Arseniy S. Kraiushkin – student of the department of Construction and Road Machines, Yaroslavl State Technical University. (150023, Russia, Yaroslavl, Moskovskii Prospect 88, E-mail: senya1257@gmail.com).