

УДК 625.084: 534.08

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-828-840>

EDN: QCIOYG

Научная статья



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО УПЛОТНЕНИЮ ГРУНТА ВИБРАЦИОННЫМ КАТКОМ НАММ 3411

И. С. Тюремнов, А. С. Краюшкин, Д. А. Шорохов*

Ярославский государственный технический университет,
г. Ярославль, Россия

tyuremnovis@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2261-4153>

senya1257@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-5078-4179>

dogpop150@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-1825-0676>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Для оценки влияния различных факторов на результат уплотнения грунта вибрационным катком используется математическое моделирование. Верификация математической модели осуществляется сравнением её с результатами экспериментальных исследований. Расширение перечня моделей катков в экспериментальных исследованиях позволяет расширить диапазон условий для верификации математической модели. В статье представлены результаты полевых экспериментальных исследований уплотнения грунта вибрационным катком НАММ 3411. Получены данные по изменению значения динамического модуля деформации грунта E_{vd} от количества проходов катка при уплотнении песчано-гравийной смеси толщиной слоя 0,5 м. Выявлены особенности, которые целесообразно учитывать при проведении дальнейших экспериментальных исследований.

Материалы и методы. Экспериментальные исследования размаха вертикальных перемещений вальца, а также вертикальных ускорений вальца и его рамы выполнялись на вибрационном катке НАММ 3411 при уплотнении песчано-гравийной смеси. Результат уплотнения грунта после каждого прохода оценивался значением динамического модуля деформации E_{vd} , измеряемым при помощи установки динамического нагружения ZORN ZFG 3.0. В эксперименте вертикальные перемещения вибрационного вальца регистрировались при помощи лазерного датчика BAUMER OADM 13U6480/S35A. Ускорения колебаний вибрационного вальца и рамы вальца регистрировались пьезоэлектрическими акселерометрами моделей AP2099-100 и AP99-100. При обработке показаний датчиков использовалась технология цифровой обработки сигналов – фильтры низких частот с граничной частотой 200 Гц.

Результаты. Исследования выполнялись на двух участках с различной влажностью грунта. На участке с переувлажненным грунтом в диапазоне значений $E_{vd} = 10...13$ МПа, амплитудные значения вертикальных ускорений вальца находились в диапазоне от +20...+45 до -25...-43 м/с², а рамы в диапазоне от +2,5...+5 до -2...-5 м/с². Размах колебаний вибровальца на участке с переувлажнённым грунтом составил 3,3...4,8 мм. На участке с грунтом с близкой к оптимальной влажности, в диапазоне значений $E_{vd} = 18...28$ МПа, амплитудные значения вертикальных ускорений вальца находились в диапазоне от +36...+48 до -35...-40 м/с², а рамы в диапазоне от +3,5...+6 до -2...-4,5 м/с².

Обсуждение и заключение. Полученные результаты показывают, что размах колебаний вальца, а также амплитудные значения вертикальных ускорений вальца и рамы вальца незначительно возрастают при увеличении модуля деформации грунта E_{vd} . Результаты проведённого эксперимента коррелируют с исследованиями проводимых на моделях катков. При измерении значений E_{vd} в одном поперечнике разница между измеренными значениями по оси движения катка и на следе от пневмоколеса достигала 30%. При анализе полученных результатов необходимо учитывать, что в эксперименте фактическая частота колебаний вальца составила 18 Гц, а не 27 Гц, как заявлено в технических характеристиках катка. При таком снижении частоты вынуждающая сила колебаний уменьшится приблизительно в 2,25 раза. Результаты эксперимента помогут в дальнейшей верификации математической модели катка и при проведении экспериментальных исследований аналогичного характера.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: грунт, уплотнение, вибрация, каток вибрационный, исследование экспериментальное, динамический модуль деформации, ускорения колебаний.

© Тюремнов И. С., Краюшкин А. С., Шорохов Д. А., 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

БЛАГОДАРНОСТИ: авторы данной статьи выражают благодарность директору ООО «АКТОР» Одинцову Александру Игоревичу за организационную помощь в проведении экспериментальных исследований, а также студенту кафедры «Строительные и дорожные машины» Ярославского государственного технического университета Ефимову Сергею Сергеевичу за помощь в проведении экспериментальных работ.

Статья поступила в редакцию 11.11.2022; одобрена после рецензирования 29.11.2022; принята к публикации 19.12.2022.

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., Краюшкин А. С., Шорохов Д. А. Экспериментальные исследования по уплотнению грунта вибрационным катком HAMM 3411 // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 6 (88). С. 828-840. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-828-840>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-828-840>

EDN: QCIOYG

EXPERIMENTAL STUDIES ON COMPACTION OF SOIL WITH HAMM 3411 VIBRATING ROLLER

Ivan S. Tyuremnov, Arseniy S. Krayushkin, Dmitry A. Shorokhov*

Yaroslavl State Technical University,
Yaroslavl, Russia

tyuremnovis@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2261-4153>

senya1257@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-5078-4179>

dogpop150@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-1825-0676>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. Mathematical modelling is used to assess the influence of various factors on the result of soil compaction by a vibratory roller. The verification of the mathematical model is carried out by comparing it with the results of the experimental studies. Expanding the list of the roller models in the experimental studies allows expanding the range of conditions for verification of the mathematical model. The article presents the results of field experimental studies of soil compaction by HAMM 3411 vibrating roller. The data on the change in the value of the dynamic soil deformation modulus E_{vd} depending on the number of passes of the roller during compaction of sand-gravel mixture with a layer thickness of 0.5 m have been obtained. The peculiarities that are reasonable to take into account when carrying out further experimental research are revealed.

Materials and methods. The experimental studies of the scope of vertical movements of the roller, as well as vertical accelerations of the roller and its frame were carried out on a HAMM 3411 vibrating roller during compaction of a sand-gravel mixture. The result of compaction of the soil after each pass was estimated by the value of the dynamic deformation modulus E_{vd} measured using the ZORN ZFG 3.0 dynamic loading unit. In the experiment, vertical movements of the vibrating roller were recorded using a BAUMER OADM 13U6480/S35A laser sensor. Accelerations of vibrations of the vibrating roller and the roller frame were recorded by piezoelectric accelerometers of the AR2099-100 and AR99-100 models. When processing sensor readings, digital signal processing technology was used – low-pass filters with a limit frequency of 200 Hz.

Results. The studies were carried out on two sites with different soil moisture. On a site with waterlogged soil in the range of E_{vd} values = 10 ... 13 MPa, the amplitude values of the vertical accelerations of the roller were in the range from +20 ... +45 to -25 ... -43 m/s², and the frames in the range from +2.5 ... +5 to -2 ... -5 m/s². The range of vibrations of the vibrating roller in the area with waterlogged soil was 3.3...4.8 mm. On a site with soil with close to optimal importance, in the range of values E_{vd} = 18...28 MPa, the amplitude values of vertical accelerations of the roller were in the range from +36 ... +48 to -35 ... -40 m/s², and frames in the range from +3.5 ... +6 to -2...-4.5 m/s².

© Tyuremnov I. S., Krayushkin A. S., Shorokhov D. A., 2022



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

Discussion and conclusion. The results show that the range of oscillations of the drum, as well as the amplitude values of vertical accelerations of the drum and the drum frame slightly increase with increasing soil deformation modulus E_{vd} . The results of the experiment correlate with the studies conducted on the models of rollers DM-614 and DM-617. When measuring values of E_{vd} in one cross-section, the difference between measured values along the axis of roller's movement and on the pneumatic wheel track reached 30%. When analyzing obtained results, it is necessary to take into account that in the experiment the actual frequency of oscillation of the roller was 18 Hz, instead of 27 Hz as stated in the technical specifications. With such reduction of frequency, the forced force of oscillations will decrease approximately 2.25 times. Results of the experiment will help in further verification of mathematical model of the roller and in carrying out experimental researches of similar character.

KEYWORDS: soil, compaction, vibration, vibratory roller, experimental study, dynamic strain modulus, vibration acceleration.

ACKNOWLEDGEMENTS: The authors of this article express gratitude to Alexander I. Odintsov, the director of OOO AKTOR for organizational assistance in conducting experimental research, as well as to Sergey S. Efimov, the student of the Construction and Road Machines Department of Yaroslavl State Technical University for assistance in conducting experimental work.

The article was submitted 11.11.2022; approved after reviewing 29.11.2022; accepted for publication 19.12.2022.

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: Tyuremnov I. S., Krayushkin A. S., Shorohov D. A. Experimental studies on compaction of soil with Hamm 3411 vibrating roller. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (6): 828-840. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-828-840>

ВВЕДЕНИЕ

Процесс уплотнения – это одна из наиболее распространённых технологий повышения прочности, несущей способности и устойчивости к погоднo-климатическим факторам всех инженерных сооружений, возводимых на грунтах. Несмотря на большое количество исследований и опыт отечественных и зарубежных специалистов, вопросы взаимодействия уплотняющих машин с грунтом изучены недостаточно, что приводит к преждевременному разрушению дорог и строительных конструкций, возведенных на грунтах.

На сегодняшний день существует три основных способа уплотнения – статическое, вибрационное и ударное^{1, 2}. Наибольшую популярность получило вибрационное уплотнение с помощью вибрационных катков. При вибрационном уплотнении рабочий орган машины совершает колебательные движения и происходит передача колебаний на уплотняемый слой³. При вибрации достигается более высокая

плотность, большая глубина уплотнения и, соответственно, более высокая производительность. Благодаря таким преимуществам вибрационное оборудование занимает сейчас около 70% рынка.

Основная цель процесса уплотнения – увеличение числа контактов между частицами уплотняемого материала путем вытеснения жидкостей и газов, а также перераспределения частиц в уплотняемом объёме материала. Благодаря этому грунт приобретает остаточную деформацию, которая выражает степень уплотнения грунта.

Схематически уплотнение можно представить как процесс увеличения числа контактов между минеральными частицами грунта за счет их перераспределения и проникновения более мелких частиц в промежутки между крупными под действием прилагаемых к грунту извне усилий. При этом грунт приобретает остаточную деформацию, оцениваемую коэффициентом уплотнения, определяемым в соответствии с СП 34.13330.2012.

¹ Комплексная автоматизация технологических процессов устройства дорожных покрытий: учебное пособие / Р. Т. Емельянов, В. И. Жаданов, Г. В. Игнатъев, И. С. Инжутов, А. П. Прокопьев. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. 132 с.

² Пиковский Я. М., Полосин-Никитин С. М., Вошинин Н. П., Баловнев В. И. Дорожные машины и оборудование / Учебник для студентов автомобильно-дорожных вузов; редактор инж. Никитин А. Г. М.: «Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы», 1960. 604 с.

³ Машины для дорожного строительства CAT. Руководство по уплотнению грунта [Электронный ресурс] (дата обращения: 10.05.2021). URL: https://www.cat.com/ru_RU/articles/support/paving-application-guides1.html

В соответствии с СП 34.13330.2021 результат уплотнения грунта оценивается коэффициентом уплотнения. Однако определение коэффициента уплотнения грунта сопряжено с влиянием большого количества факторов, снижающих достоверность результатов. К тому же коэффициент уплотнения не отражает прочностные характеристики грунта и его способность воспринимать механические нагрузки [1, 2]. Более перспективно применение для оценки результатов уплотнения грунтов динамического и статического модуля деформации в соответствии с ГОСТ Р 59866–2022⁴.

Для совершенствования техники и технологии уплотнения грунтов необходимо разработать математическую модель влияния режимов нагружения и характеристик рабочего органа на результат уплотнения грунта в конкретных условиях. Традиционно для задач моделирования процессов уплотнения грунта применялись методы реологического моделирования, полуэмпирические методы и методы на основе уравнений механики сплошной среды. Анализ работ различных авторов по математическому моделированию [3, 4, 5, 6, 7, 8] показал, что математическая модель взаимодействия вибрационного катка с уплотняемым грунтом должна описывать особенности колебаний элементов вибрационного катка (вальца и рамы вальца). Помимо этого, математическая модель должна описывать процессы изменения напряженно-деформированного состояния грунта. Поскольку грунт является сложной многофазной средой, а вибрационный каток является многомассной колебательной системой с нелинейными связями, то для упрощения разрабатываемых математических моделей вводят различные допущения. Это приводит к необходимости последующей верификации математической модели посредством сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными. Эксперименты желательно проводить в полевых условиях на серийно выпускаемых машинах при уплотнении различных строи-

тельных материалов. Для верификации можно использовать характеристики колебаний элементов вибрационного катка (перемещения и ускорения вальца и рамы вальца), напряжения на различных глубинах грунта, значения коэффициента уплотнения и динамического или статического модуля деформации грунта. Проанализировав существующие результаты экспериментальных исследований уплотнения грунта вибрационным катком [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15], сделали вывод, что в большинстве случаев исследователи указывают только модель вибрационного катка, без уточнения массы вальца, массы рамы, количества и характеристики амортизаторов и других параметров, необходимых для верификации математической модели⁵. В связи с этим следует расширять перечень моделей катков и диапазоны условий, в которых проводятся экспериментальные исследования.

В данной статье приведены результаты экспериментальных исследований с вибрационным катком НАММ 3411. Эксперимент осуществлялся в полевых условиях для использования при верификации математических моделей взаимодействия вибрационного катка с уплотняемым грунтом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальные исследования проводились в августе 2021 г. на одной из строительных площадок г. Ярославля.

В исследованиях использовался вибрационный каток НАММ 3411 с характеристиками⁶: масса катка эксплуатационная – 12830 кг; мощность двигателя – 100 кВт; частота колебаний вибратора – 27/37 Гц; уплотняющее усилие – 246/144 кН; линейное статическое давление вальца – 29,2 кг/см; амплитуда колебаний вальца – 1,9/0,8 мм; диаметр/ширина вальца – 1504/2140 мм; колеса AW 23.1-26 12 PR; амортизаторы вальца (модели НАММ 1487116) установлены в количестве 14 шт.

⁴ ГОСТ Р 59866–2022 Дороги автомобильные общего пользования. Показатели деформативности конструктивных слоев дорожной одежды из несвязных материалов и грунтов земляного полотна. Технические требования и методы определения [Электронный ресурс]. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/775/77552.pdf> (дата обращения: 10.09.2022).

⁵ Тюремнов И. С., Морев А. С., Фурманов Д. В. Экспериментальные исследования вертикальных перемещений и ускорений колебаний вальца вибрационного катка DM-617 при уплотнении грунта // В сборнике: Проблемы машиноведения. Материалы IV Международной научно-технической конференции. Научный редактор П. Д. Балакин. 2020 С. 121–128.

⁶ НАММ3411 Грунтовые катки Серия 3000. Модельный ряд Н179 https://www.modernmachinery.ru/images/HAMM/3411_TCD2012L04_W_V4_ru_RU.pdf (дата обращения: 06.07.2022).



Рисунок 1 – Расположение акселерометров: на вальце катка (левый рисунок) и на раме вальца (правый рисунок)
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – The location of accelerometers: on the roller (left picture) and on the roller frame (right picture)
Source: compiled by the authors.

Уплотняемый грунт – природная песчано-гравийная смесь (содержание гравия не менее 30%, глинистых частиц 3...4%), отсыпался слоем толщиной 0,5 м на специально отведенном участке строительной площадки.

Ускорения колебаний вибрационного вальца и рамы вальца регистрировались при помощи пьезоэлектрических акселерометров со встроенной электроникой моделей AP2099-100 (вальец катка) и AP99-100 (рама катка) производства ООО «Глобал-Тест» (г. Саров, Россия)⁷. Крепления датчиков осуществлялось при помощи магнитов, усилие которых составляет 220 Н. С учётом массы датчиков (45 г) и массы магнитов (28 г) обеспечивалась надёжная фиксация. Установка датчика на раму катка осуществлялась непосредственно на раме, а на вибровальце – на кронштейне. Оба датчика устанавливались вертикально в плоскости, проходящей через продольную ось вращения вибровальца (рисунок 1).

В эксперименте измерялись также вертикальные перемещения вибрационного вальца. Данные измерения осуществлялись при помощи лазерного датчика BAUMER OADM

13U6480/S35A с характеристиками⁸: диапазон измерений 50...550 мм; разрешение 0,01...1,1 мм; линейная ошибка $\pm 0,08... \pm 3,5$ мм; время отклика $< 0,9$ мс; ошибка линейности при диапазоне измерений 100–150 мм от верхней точки обечайки вальца составляет не более 0,3 мм. В процессе измерений налипший грунт счищался скребком для исключения его влияния на результаты измерений (рисунок 2).

Показания акселерометров и датчика перемещений фиксировались с помощью анализатора спектра ZET 017-U8 производства компании ZETLAB (г. Зеленоград, Россия)⁹. Измерения проводились при частоте дискретизации 5000 Гц. Всё оборудование, в том числе анализатор спектра, было запитано от автономного аккумулятора и располагалось в кабине оператора катка.

Во время испытаний за один проход катка принималось движение по участку вперёд с включенным вибратором. Движение назад осуществлялось без вибрации. При работе катков HAMM 3411 использовал только один режим работы с максимальным вынуждающим усилием.

⁷ Вибропреобразователь AP2099-100 [Электронный ресурс]. URL: <https://globaltest.ru/product/vibropreobrazovatel-ar2099-100/> (дата обращения: 06.07.2022).

⁸ Лазерный датчик BAUMER OADM 13U6480/S35A [Электронный ресурс]. URL: <https://www.datasheets360.com/pdf-1124803611755666485> (дата обращения: 07.07.2022).

⁹ Анализатор спектра ZET 017-U8 [Электронный ресурс]. URL: <https://zetlab.com/shop/izmeritelnoe-oborudovanie/analizatory/analizator-spektra-zet017-u8/> (дата обращения: 07.07.2022).



Рисунок 2 – Измерения вертикальных перемещений вальца катка HAMM 3411 лазерным датчиком BAUMEROADM 13U6480/S35A
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – The measurement for the vertical displacement of HAMM 3411 roller with BAUMER OADM 13U6480/S35A laser sensor
Source: compiled by the authors.



Рисунок 3 – Измерение модуля динамического нагружения грунта установкой ZORN ZFG3.0
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – The measurement of the dynamic loading modulus of soil with ZORN ZFG 3.0
Source: compiled by the authors.

Результат уплотнения грунта после каждого прохода оценивался значением динамического модуля деформации E_{vd} , измеряемым при помощи установки динамического нагружения ZORN ZFG 3.0 (рисунок 3)¹⁰.

Измерение значений E_{vd} осуществлялось после окончания каждого прохода катка в трех точках следа вальца, поперёк направления движения (посередине следа и на расстоянии 0,4...0,5 м от правой и левой границы следа) и

затем усреднялось. Каждая серия измерений значений E_{vd} выполнялась со смещением вперёд на 1–2 м по отношению к участку предыдущих измерений.

Регистрация показаний датчиков включалась при приближении вибрационного катка к месту экспериментального участка за несколько метров и останавливалась, когда каток съезжал с исследуемого участка.

¹⁰ Установки динамического нагружения ZORN ZFG 3.0. [Электронный ресурс]. URL: <https://zfg-3000.ru/catalog/4/> (дата обращения: 07.07.2022).

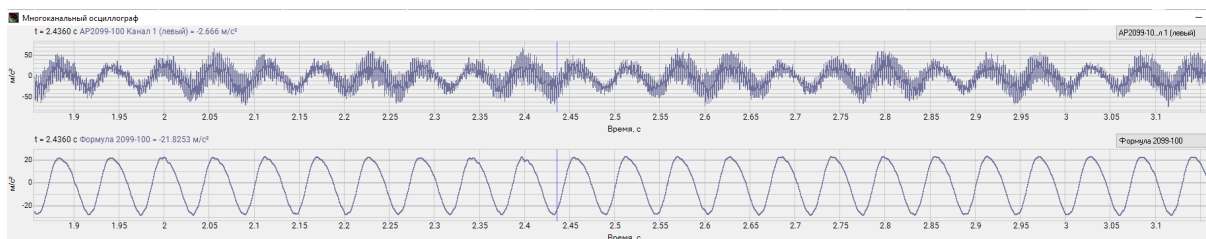


Рисунок 4 – Осциллограммы исходных показаний датчика ускорений вальца катка AP2099-100 и с применением цифровой фильтрации сигнала
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – An oscillograms of the initial readings of the acceleration sensor of the roller AP2099-100 and using digital signal filtering
Source: compiled by the authors.

Анализ показаний датчиков показывает наличие в них значительных шумов, существенно затрудняющих определение амплитудных значений сигналов (рисунок 4). Поэтому применялась технология цифровой фильтрации сигналов датчиков. На рисунке 4 приведен пример результатов обработки исходного сигнала датчика виброускорений с использованием фильтров низкой частоты. Верхняя осциллограмма (см. рисунок 4) показывает сигнал, получаемый с датчика AP2099-100. Можно заметить, что на сигнал накладываются искажающие шумы. Источниками искажений могут являться различные узлы механизмов и систем катка, а также электрические помехи на записывающее оборудование. Из опыта прошлых исследований [13,14] было принято решение для цифровой обработки сигнала использовать фильтр низких частот с граничной частотой 200 Гц в составе инструмента «Формула» программного комплекса ZETLAB ANALIZ. На представленном рисунке (см. рисунок 4) нижняя осциллограмма показывает результат фильтрации исходного сигнала.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В процессе экспериментальных исследований работы выполнялись на двух участках с одинаковым видом грунта. На участке №1 выполнялись работы во время затяжного дождя и на переувлажнённом грунте, а на участке №2 на грунте с влажностью, близкой к оптимальной.

Данный анализ показал волнообразный характер изменения динамического модуля деформации грунта E_{vd} на участке №2 (рисунок 5). Выявлено, что меньшие значения E_{vd} наблюдались посередине следа вальца катка, а у краёв значения возрастали. Данное явление может быть объяснено дополнительным уплотнением от пневмоколес катка.

На участке №1 значения модуля деформации грунта E_{vd} оказались значительно меньше и в течение всех проходов практически не возрастали (см. рисунок 5). Связано это с тем, что когда грунт переувлажнен, уплотнение не осуществляется. Результаты измерений вертикальных перемещений вибровальца катка НАММ 3411 в процессе установившихся колебаний на участке №1 приведены на рисунке 6.

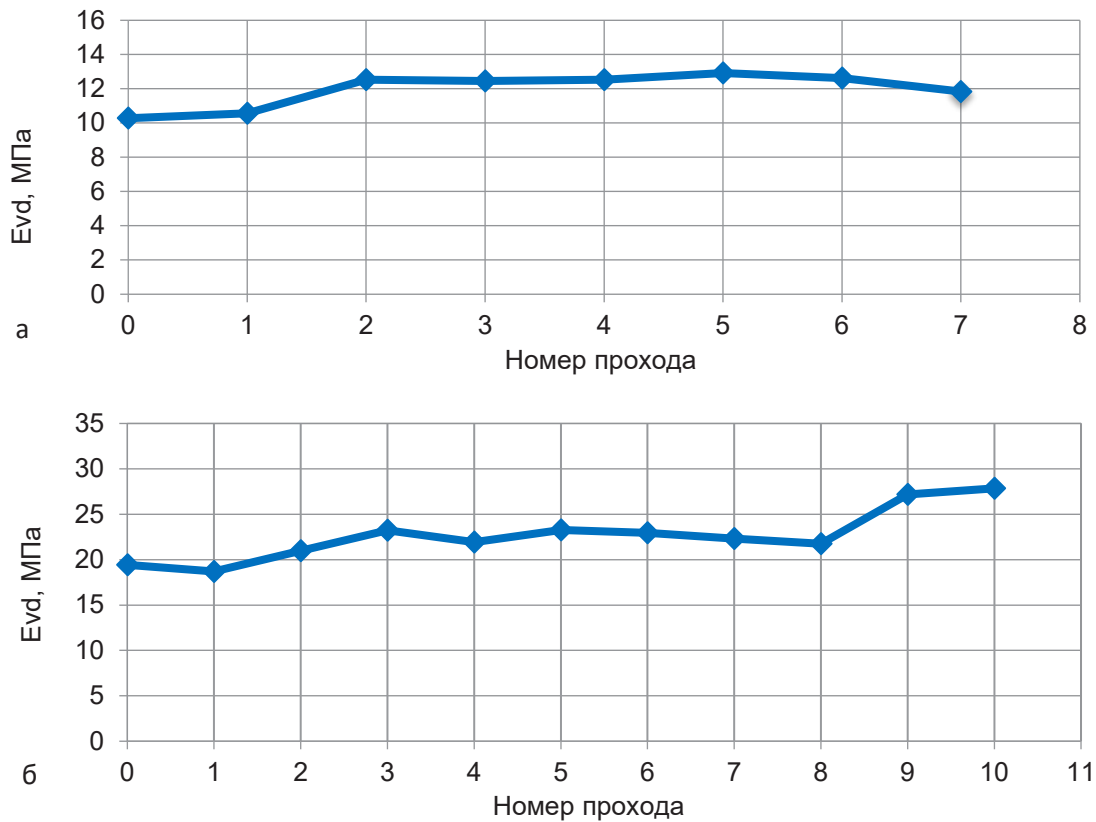


Рисунок 5 – Графики изменения динамического модуля деформации грунта E_{vd} по проходам катка HAMM 3411: а – на участке №1; б – на участке №2
 Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Graphs of changes in the dynamic modulus of soil deformation E_{vd} along the passages of the HAMM 3411 skating rink: а – on site No. 1; б – on site No. 2
 Source: compiled by the authors.

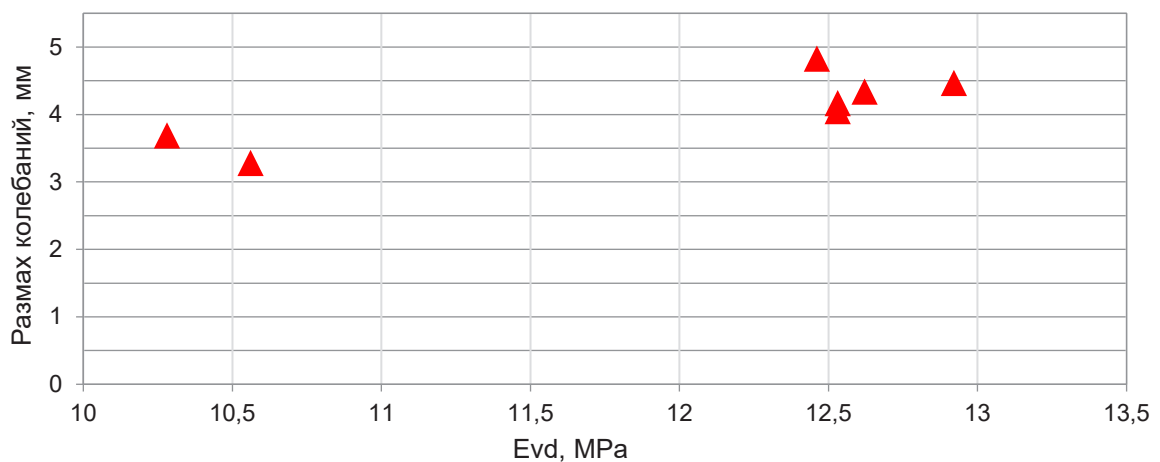


Рисунок 6 – Результаты измерения размаха вертикальных колебаний вальца катка HAMM 3411 в процессе установившейся вибрации при уплотнении грунта участка №1
 Источник: составлено авторами.

Figure 6 – The results of measuring the range of vertical vibrations of HAMM 3411 roller in the process of steady-state vibration during soil compaction in section No. 1
 Source: compiled by the authors.

Результаты измерений вертикальных ускорений вибровальца и вертикальных ускорений рамы катка HAMM 3411 в процессе уплот-

нения грунта на участке №1, при движении с установившейся вибрацией, приведены на рисунках 7, 8.

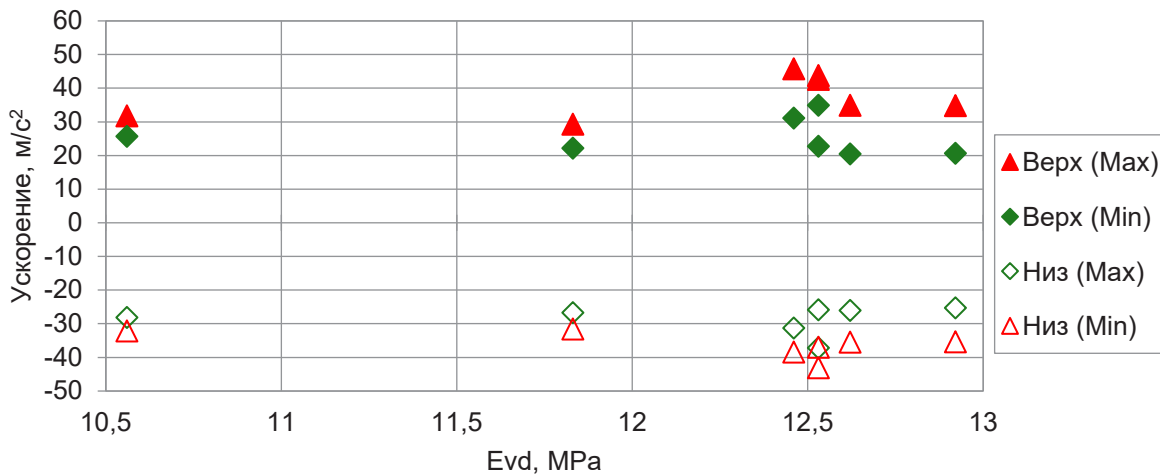


Рисунок 7 – Результаты измерений амплитудных значений вертикальных ускорений вибровальца катка HAMM 3411 в процессе установившейся вибрации при уплотнении участка №1
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – The results of measurements of the amplitude values of vertical accelerations of the vibrating roller of HAMM 3411 roller in the process of steady vibration during the compaction of section No.1
Source: compiled by the authors.

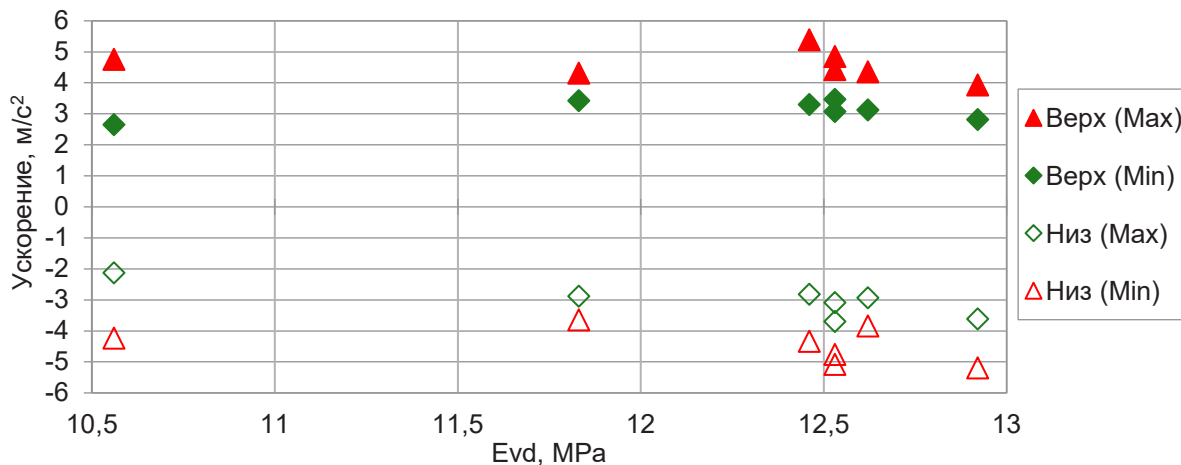


Рисунок 8 – Результаты измерений амплитудных значений вертикальных ускорений рамы вальца катка HAMM 3411 в процессе установившейся вибрации при уплотнении на участке №1
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Results of measurements of the amplitude values of vertical accelerations of the roller frame of HAMM 3411 roller in the process of steady vibration during compaction in section No. 1
Source: compiled by the authors.

Результаты измерений вертикальных ускорений вибровальца и вертикальных ускорений рамы катка HAMM 3411 в процессе уплот-

нения грунта на участке №2, при движении с установившейся вибрацией, приведены на рисунках 9, 10.

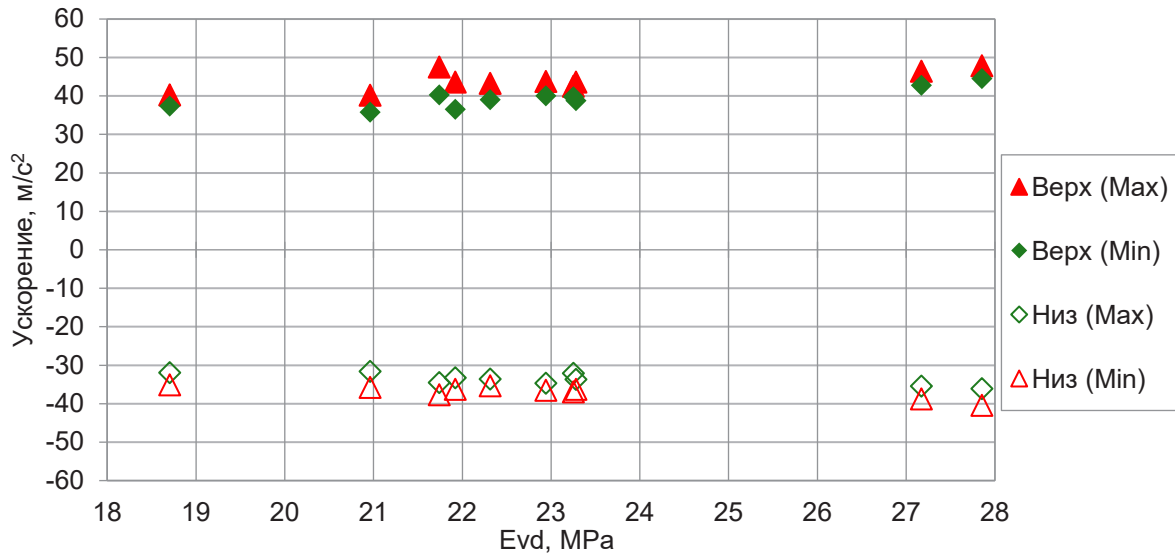


Рисунок 9 – Результаты измерений амплитудных значений вертикальных ускорений вибровальца катка HAMM 3411 в процессе установившейся вибрации при уплотнении участка №2
Источник: составлено авторами.

Figure 9 – The results of measurements of the amplitude values of vertical accelerations of HAMM 3411 vibrating roller in the process of steady vibration during compaction of section No. 2
Source: compiled by the authors.

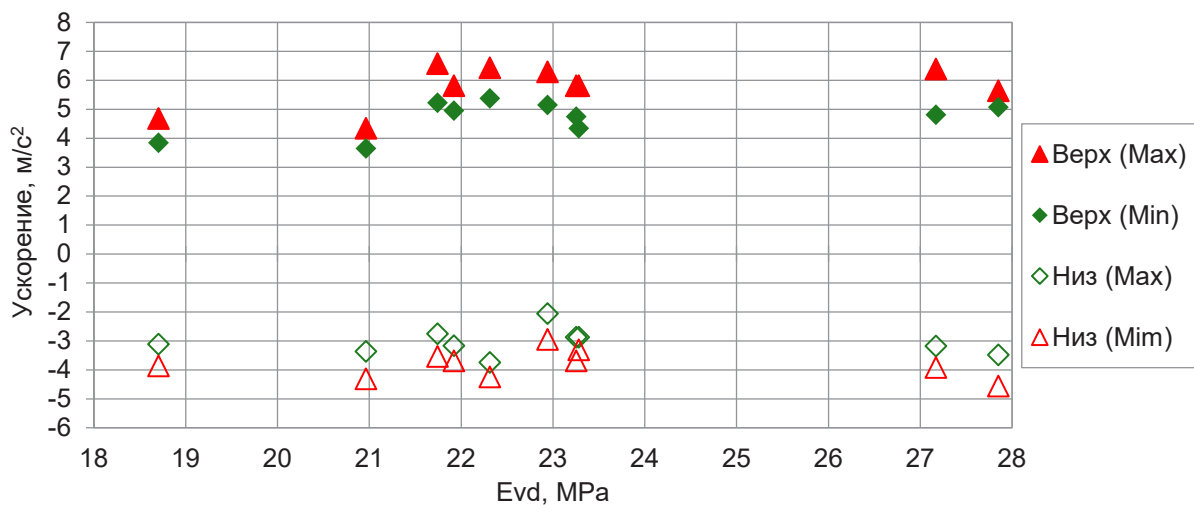


Рисунок 10 – Результаты измерений амплитудных значений вертикальных ускорений рамы вальца катка HAMM 3411 в процессе установившейся вибрации при уплотнении участка №2
Источник: составлено авторами.

Figure 10 – The results of measurements of the amplitude values of vertical accelerations of the roller frame of the HAMM 3411 roller in the process of steady vibration during compaction of section No. 2
Source: compiled by the authors.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты показывают, что размах колебаний и амплитудные значения вертикальных ускорений вибрационного вальца и рамы вальца незначительно возрастают при увеличении модуля деформации грунта E_{vd} . Результаты проведенного эксперимента коррелируются с исследованиями проводимых на других моделях катков [14, 15].

При измерении значений E_{vd} в одном перечнике разница между измеренными значениями по оси движения катка и на следе от пневмоколеса могла достигать 30%, поэтому в дальнейших исследованиях целесообразно значения E_{vd} измерять не на следе от пневмоколеса катка. Дополнительное уплотнение грунта пневмоколесами будет в этом случае работать в запас несущей способности грунта.

Динамический модуль деформации грунта при переувлажненном грунте находился в диапазоне $E_{vd} = 10...13$ МПа, а при грунте оптимальной влажности $E_{vd} = 18...28$ МПа. Размах вертикальных перемещений вибрационного вальца при уплотнении переувлажненного грунта составил 3,3...4,8 мм. Вертикальные ускорения вибрационного вальца при уплотнении переувлажненного грунта находились в диапазоне от +20...+45 до -25...-43 м/с², а у оптимального влажного грунта +36...+48 до -35...-40 м/с². При уплотнении переувлажненного грунта вертикальные ускорения рамы вальца находятся в диапазоне от +2,5...+5 до -2...-5 м/с², а у оптимального влажного грунта +3,5...+6 до -2...-4,5 м/с².

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При анализе полученных результатов необходимо учитывать, что в эксперименте фактическая частота колебаний составила 18 Гц, а не 27 Гц, как заявлено в технических характеристиках катка НАММ 3411. При таком снижении частоты, вынуждающая сила колебаний уменьшится приблизительно 2,25 раза. В последующих работах целесообразно перед экспериментом сначала убедиться, что машина исправна и работает на заданных частотах колебаний вальца, и только после этого проводить эксперимент.

Полученные результаты могут быть использованы для верификации математической модели взаимодействия вибрационного катка с уплотняемым грунтом и при проведении экс-

периментальных исследований аналогичного характера.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Костельов М. П. Опять о качестве и эффективности уплотнения различных грунтов современными виброкатками // Каталог-справочник «Дорожная техника и технологии». 2008. С. 12–19.
2. Тюремнов И. С., Игнатьев А. А. О совершенствовании критериев уплотнения дорожно-строительных материалов // Автомобильные дороги. 2010. № 5. С. 67–69.
3. Dobrescu C. The Dynamic Response of the Vibrating Compactor Roller, Depending on the Viscoelastic Properties of the Soil // Applied System Innovation. 2020. Т. 3. №. 2. С. 25.
4. Шабанова Г. И., Савельев С. В., Бурый Г. Г. Математическое описание колебательной системы «вибрационный рабочий орган – грунт» // Вестник СибАДИ. 2013. № 3 (31). С. 101–207.
5. Тюремнов И. С., Игнатов А. А. Математическая модель процесса уплотнения грунта вибрационным катком в режиме постоянного контакта // Современное машиностроение. Наука и образование. 2017. № 6. С. 794–803. DOI 10.1872/MMF-2017-71. EDNYSZWPP.
6. Kenneally B., Musimbi O. M., Wang J., Mooney M. A. Finite element analysis of vibratory roller response on layered soil systems Comput. Geotech. 2015. 67. pp. 73-82
7. Saberi M., C.-D. Annan, J.-M. Konrad Three-dimensional constitutive model for cyclic behavior of soil-structure interfaces. Soil Dyn. Earthq Eng. Times, 134 (2020), Article 106162
8. Fathi A., C. Tirado, S. Rocha, M. Mazari, S. Nazarian Assessing depth of influence of intelligent compaction rollers by integrating laboratory testing and field measurements Transp. Geotech., 28 (2021), Article 100509
9. 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.
10. Савельев С.В., Бурый Г.Г. Экспериментальные исследования «активной области» деформируемой среды при вибрационном уплотнении // Вестник СибАДИ. 2012. № 5 (27). С. 88–94.
11. Q. Xu, G.K. Chang, V.L. Gallivan Development of a systematic method for intelligent compaction data analysis and management Construct. Build. Mater., 37 (2012), pp. 470-480.
12. Liu D.H., Li, Z.L., Lian, Z.H.: Compaction quality assessment of earth-rock dam materials using roller integrated compaction monitoring technology. Automat. Constr. 44, 234–246. (2014).
13. Han, Yixuan et al. “Study on Intelligent Compaction-Equipment Logistics Scheduling and Propagation Characteristics of Vibration Wave in

Nonlinear Systems with Multistability Based on Field Test." *Complex*. 2020 (2020).

14. Тюремнов И. С., Иванов С. Н., Краюшкин А. С. Результаты экспериментальных исследований ускорений колебаний виброролца катка DM-617 с использованием технологии цифровой обработки сигнала // Вестник СибАДИ. 2020. Т. 17, № 2(72). С. 182–195. DOI 10.26518/2071-7296-2020-17-2-182-195.

15. T. Pei, X. Yang Compaction-induced stress in geosynthetic-reinforced granular base course—A discrete element model. *J. Rock Mech. Geotech Eng. Times*, 10 (4) (2018), pp. 669-677.

REFERENCES

1. Kostel'ov M. P. Opjat' o kachestvejfeffektivnostiuplotnenijarazlichnyhgruntovsovmennymvibrokatkami [Again about the quality and efficiency of compaction of various soils with modern vibratory rollers]. *Katalog- spravochnik «Dorozhnaja tehnika i tehnologii*. 2008:12-19. (In Russ.).

2. Tjurementov I. S., Ignat'ev A. A. O sovershenstvovaniikriterievuplotnenijadorozhno-stroitel'nyhmaterialov [On improving the criteria for compaction of road-building materials]. *Avtomobil'nye dorogi*. 2010; 5: 67- 69. (in Russ).

3. Dobrescu C. The Dynamic Response of the Vibrating Compactor Roller, Depending on the Viscoelastic Properties of the Soil. *Applied System Innovation*. 2020; T. 3. №. 2: 25.

4. Shabanova G. I., Savel'ev S. V., Buryj G. G. Matematicheskoe opisanie kolebatel'noj sistemy «vibracionnyj rabochij organ – grunt» [Mathematical description of the oscillatory system "vibrating working organ – ground"]. *Vestnik Sibirskoj gosudarstvennoj avtomobil'no-dorozhnoj akademii*. 2013; 3 (31):1–01207. (in Russ.).

5. Tjurementov I. S., Ignat'ev A. A. Matematicheskaja model' processa uplotnenija grunta vibracionnym katkom v rezhime postojannogo kontakta [Mathematical model of the process of compaction of soil by a vibrating roller in the mode of constant contact]. *Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie*. 2017; 6: 794-803. DOI 10.1872/MMF-2017-71. EDN YSZWPP.

6. KenneallyB., MusimbiO. M., J. Wang, M.A. Mooney Finite element analysis of vibratory roller response on layered soil systems *Comput. Geotech.*, 67 (2015). pp. 73-82.

7. M. Saberi, C.-D. Annan, J.-M. Konrad Three-dimensional constitutive model for cyclic behavior of soil-structure interfaces. *Soil Dyn. Earthq Eng. Times*, 134 (2020), Article 106162.

8. Fathi C. Tirado, S. Rocha, M. Mazari, S. Nazarian Assessing depth of influence of intelligent compaction rollers by integrating laboratory testing and field measurements *Transp. Geotech.*, 28 (2021), Article 100509.

9. 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.

10. Savel'ev S. V., Buryj G. G. Jeksperimental'nye issledovanija «aktivnoj oblasti» deformiruemoj sredy pri vibracionnom uplotnenii [Experimental studies of the "active region" of a deformable medium under vibration compaction]. *Vestnik Sibirskoj gosudarstvennoj avtomobil'no-dorozhnoj akademii*. 2012; 5 (27):88–94. (In Russ.).

11. Q. Xu, G.K. Chang, V.L. Gallivan Development of a systematic method for intelligent compaction data analysis and management *Construct. Build. Mater.*, 37 (2012), pp. 470-480.

12. Liu, D.H., Li, Z.L., Lian, Z.H.: Compaction quality assessment of earth-rock dam materials using roller integrated compaction monitoring technology. *Automat. Constr.* 44, 234–246. (2014).

13. Han, Yixuan et al. "Study on Intelligent Compaction-Equipment Logistics Scheduling and Propagation Characteristics of Vibration Wave in Nonlinear Systems with Multistability Based on Field Test." *Complex*. 2020 (2020).

14. Tjurementov 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. (In Russ.).

15. T. Pei, X. Yang Compaction-induced stress in geosynthetic-reinforced granular base course—A discrete element model. *J. Rock Mech. Geotech Eng. Times*. 10 (4) (2018): 669-677.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Тюремнов И. С. Общая организация работы авторского коллектива, формулирование цели и задач исследования, разработка методики проведения исследования, организация и проведение экспериментальных исследований, написание текста статьи.

Краюшкин А. С. Обработка экспериментальных данных, подготовка материала для статьи.

Шорохов Д. А. Обработка экспериментальных данных, подготовка материала для статьи.

COAUTHOR'S CONTRIBUTION

Ivan S. Tyumentov— general organization of work of the author 's team, formulation of the purpose and objectives of the study, formulation of the purpose and objectives of the exploration, organization and carrying out of the experimental exploration, writing the text of article.

Arseniy S. Krayushkin— processing the experimental findings, preparing material for the paper.

Dmitry A. Shorohov— processing the experimental findings, preparing material for the paper.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тюремнов Иван Сергеевич – канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Строительные и дорожные машины».

Краюшкин Арсений Сергеевич – ассистент кафедры «Строительные и дорожные машины».

Шорохов Дмитрий Александрович – студент кафедры «Строительные и дорожные машины».

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Ivan S. Tyuremnov – Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Construction and Road Machines Department.

Arseniy S. Krayushkin – Assistant of the Construction and Road Machines Department.

Dmitry A. Shorohov – Student of the Construction and Road Machines Department.