

УДК (UDC) 625.084: 534.08

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТА
КОМБИНИРОВАННЫМ ВИБРАЦИОННЫМ КАТКОМ DM-58
В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХEXPERIMENTAL STUDIES ON SOIL COMPACTION BY THE DM-58 COMBINED
VIBRATORY ROLLER IN THE FIELD CONDITIONSКраюшкин А.С., Тюремнов И.С., Шорохов Д.А.
Krayushkin A.S., Tyuremnov I.S., Shorohov D.A.Ярославский государственный технический университет (Ярославль, Россия)
Yaroslavl State Technical University (Yaroslavl, Russian Federation)

Аннотация. Целью представленной работы является получение экспериментальных данных для оценки технологических возможностей катка DM-58 и верификации математической модели взаимодействия вибрационного катка с грунтом. Экспериментальные исследования выполнялись на вибрационном комбинированном катке DM-58 при уплотнении песчано-гравелистого грунта толщиной слоя 0,5...0,55 м. Исследования проводились на двух участках со сходными грунтовыми и технологическими условиями. Результат уплотнения грунта после каждого прохода катка DM-58 оценивался значением динамического модуля деформации грунта, измеряемым установкой динамического нагружения ZORN ZFG 3.0. В эксперименте регистрировались вертикальные перемещения вибрационного вальца, ускорения вертикальных колебаний вибрационного вальца и рамы вальца. При обработке результатов эксперимента была применена технология цифровой фильтрации сигналов датчиков (фильтр низких частот с граничной частотой 200 Гц). Были получены данные по изменению значения динамического модуля деформации грунта от количества проходов катка DM-58. За 10...12 проходов катка достигается значение динамического модуля деформации 30 МПа. Установлено, что размах вертикальных колебаний вальца составлял, в среднем, 2...2,5 мм, независимо от значений динамического модуля деформации. Амплитудные значения ускорений вертикальных колебаний рамы вальца составили от +4,5...+7,8 до -4,8...-8,1 м/с² и также не зависели от значений динамического модуля деформации. Полученные результаты позволяют оценить технологические возможности катка DM-58 и верифицировать математическую модель уплотнения грунта грунтовыми вибрационными катками.

Ключевые слова: грунт, уплотнение, вибрация, каток грунтовый, каток вибрационный.

Дата получения статьи: 15.05.2024
Дата принятия к публикации: 05.03.2025
Дата публикации: 25.06.2025

Abstract. The purpose of the presented work is to obtain experimental data to evaluate the technological capabilities of the DM-58 roller and verify the mathematical model of the interaction of a vibrating roller with the ground. Experimental studies were performed on a DM-58 vibrating combined roller with compaction of sandy-gravelly soil with a layer thickness of 0.5...0.55 m. The studies were conducted at two sites with similar soil and technological conditions. The result of soil compaction after each pass of the DM-58 roller was estimated by the value of the dynamic modulus of soil deformation. The measurement was carried out by the ZORN ZFG 3.0 dynamic loading unit. In the experiment, vertical movements of the vibrating roller, acceleration of vertical vibrations of the vibrating roller and the roller frame were recorded. When processing the experimental results, the technology of digital filtering of sensor signals (a low-pass filter with a boundary frequency of 200 Hz) was applied. Data were obtained on the change in the value of the dynamic modulus of soil deformation from the number of passes of the DM-58 roller. In 10...12 passes of the roller, the value of the dynamic modulus of deformation of 30 MPa is achieved. It was found that the span of the vertical vibrations of the roller was, on average, 2...2.5 mm, regardless of the values of the dynamic modulus of deformation. The amplitude values of the accelerations of the vertical vibrations of the roller frame ranged from +4.5...+7.8 to -4.8...-8.1 m/s² and also did not depend on the values of the dynamic modulus of deformation. The obtained results allow us to evaluate the technological capabilities of the DM-58 roller and verify the mathematical model of soil compaction with ground vibration rollers.

Keywords: soil, compaction, vibration, soil compactor, vibratory roller.

Date of manuscript reception: 15.05.2024
Date of acceptance for publication: 05.03.2025
Date of publication: 25.06.2025

Сведения об авторах:

Краюшкин Арсений Сергеевич – старший преподаватель кафедры «Строительные и дорожные машины», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет»,
e-mail: senya1257@gmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5078-4179>

Тюремнов Иван Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Строительные и дорожные машины», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет»,
e-mail: tyuremnovis@yandex.ru.

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

Шорохов Дмитрий Александрович – аспирант кафедры «Строительные и дорожные машины», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет»,
e-mail: dopop150@gmail.com.

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

Authors' information:

Arseniy S. Krayushkin – Senior Lecturer of the Department of Construction and Road Machinery, Yaroslavl State Technical University,
e-mail: senya1257@gmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5078-4179>

Ivan S. Tyuremnov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Construction and Road Machinery, Yaroslavl State Technical University, *e-mail: tyuremnovis@yandex.ru.*

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

Dmitriy A. Shorohov – Postgraduate student of the Department of Construction and Road Machinery, Yaroslavl State Technical University,
e-mail: dopop150@gmail.com.

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

1. 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 [1]. Некачественное уплотнение грунтов приводит к преждевременному разрушению дорог и строительных конструкций. Несмотря на большое количество научных работ и многолетнюю практику применения, вопросы теории и практики уплотнения грунтов ещё до конца не решены.

На сегодняшний день существует три основных вида уплотнения – это статическое, вибрационное и ударное [2]. Наибольшую популярность получило вибрационное уплотнение дорожными и грунтовыми катками. При виброуплотнении машина совершает колебательные движения и происходит передача колебаний на уплотняемый слой [3]. Причины такой популярности – при вибрации достигается более высокая плотность, большая глубина уплотнения и соответственно более высокая производительность. Благодаря таким преимуществам вибрационное оборудование занимает сейчас около 70% рынка [4 - 7].

Сущность процесса уплотнения состоит в том, что под воздействием сил на уплотняемый материал, происходит сближения частиц и более компактное их расположение в уплотняемом объёме материала. Данный

процесс осуществляется путём вытеснения жидкостей и газов, а также, перемещением мелких частиц в пустоты между более крупными. Благодаря этому грунт приобретает остаточную деформацию, которая отражает степень уплотнения грунта. В соответствии со сводом правил СП 34.13330.2021 [8] именно коэффициент уплотнения оценивает плотность рабочего слоя грунта. Однако определение коэффициента уплотнения грунта сопряжено с влиянием большого количества факторов, снижающих достоверность результатов. К тому же коэффициент уплотнения грунта не отражает прочностные характеристики грунта и его способность воспринимать механические нагрузки [9]. Более перспективно применение для оценки результатов уплотнения грунтов применение динамического и статического модуля деформации, в соответствии с национальным стандартом Российской Федерации ГОСТ Р 59866-2022 [10].

Для совершенствования техники уплотнения грунтов исследователи и инженеры прибегают к разработке математической модели. Модель должна описывать влияние режима нагружения и характеристик рабочего органа на результат уплотнения. Традиционно сложилось, что 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 ма-

тематическому моделированию [1, 3, 11 - 18] показал, что модель в процессе вибрационного нагружения грунта должна описывать особенности колебаний элементов вибрационного катка. Помимо этого, математическая модель должна описывать процессы изменения напряженно-деформированного состояния грунта. Любая математическая модель требует обязательной верификации, которая включает в себя сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными. Эксперименты целесообразно проводить в полевых условиях на серийно выпускаемых машинах при уплотнении материалов с известными характеристиками. Для последующей верификации могут быть использованы значения перемещений и ускорения вальца катка и рамы катка, а также характеристики самого уплотняемого материала. Расширение модельного ряда катков и условий их применения в экспериментальных исследованиях позволяет строителям и исследователям принимать более обоснованные решения по использованию вибрационных катков в различных технологических условиях и расширяет возможности по верификации математических моделей уплотнения грунта вибрационными катками.

В данной статье приведены результаты экспериментальных исследований уплотнения грунта вибрационным катком DM-58 в полевых условиях.

2. Материалы и методы

Целью исследований являлось получение экспериментальных данных по характеристикам колебаний элементов вибрационного катка DM-58 и оценки технологических возможностей данного катка в реальных условиях производства работ. Задачами исследований являлись измерения значений ускорений вертикальных колебаний рамы и вальца, вертикальных перемещений вибрационного вальца, а также динамического модуля деформации грунта при его уплотнении серийно выпускаемым катком DM-58 (производства ООО «Завод «Дорожных машин»», г.

Рыбинск, Ярославская область) в полевых условиях.

Экспериментальные исследования проводились в августе 2022 года на одной из строительных площадок города Гаврилов-Ям, Ярославской области.

В исследованиях использовался вибрационный комбинированный каток DM-58 (рис.1) с характеристиками [19]:

- масса катка эксплуатационная 14000 кг;
- мощность двигателя 132 кВт;
- частота колебаний вибратора 40/40 Гц;
- центробежная сила вибровозбудителя 90/140 кН;
- линейное статическое давление вальца 35 кг/см;
- амплитуда колебаний вальца 0,45/0,85 мм;
- диаметр/ширина вальца 1550/2000 мм.



Рис. 1. Комбинированный вибрационный каток DM-58 на экспериментальной площадке

Уплотняемый грунт являлся песчано-гравелистым. Смесь отсыпалась слоем толщиной 0,5...0,55 м на специальном отведенном участке строительной площадки. Характеристики уплотняемого материала представлены в табл. 1.

Ускорения вертикальных колебаний рамы вальца измерялись при помощи пьезоэлектрического акселерометра AP99-500 [20].

Крепление акселерометра осуществлялось при помощи магнита, усилие которого составляет 220 Н.

Таблица 1

Физико-механические показатели песчано-гравелистой смеси

Наименование показателя	Значение
Содержания гравия, %	19,1
Содержание пылевидных и глинистых частиц, %	2,8
Полный остаток на сите по массе, %	9,7
Модуль крупности песка	2,2 средний II класс
Содержание глины в комках, %	0,4
Полный проход для песка на сите 0,16, %	12,7
Коэффициент фильтрации, м/сут	1,8

С учётом массы датчика (45 г) и массы магнита (28 г) это обеспечивало надёжную фиксацию. Установка акселерометра на раме катка осуществлялась вертикально, непосредственно на раме вальца в плоскости, проходящей через продольную ось вращения вибровальца (рис.2).

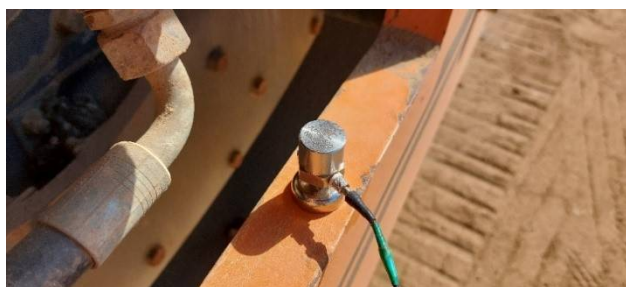


Рис.2. Место установки пьезоэлектрического акселерометр AP99-500 на раме вибровальца

В эксперименте измерялись так же вертикальные перемещения вибрационного вальца. Данные измерения осуществлялись при помощи лазерного датчика BAUMER OADM 13U6480/S35A с характеристиками [21]:

- диапазон измерений 50...550 мм;
- разрешение 0,25 мм;
- линейная ошибка 0,8 мм;
- время отклика < 0,9 мс.

Измерения производились в процессе движения катка с установившейся вибрацией. Лазерный датчик удерживался на вытянутой руке в пределах 100...150 мм от верхней точки обечайки вальца катка (рис.3).

Показания акселерометров и датчика перемещений фиксировались с помощью анализатора спектра ZET 017-U8 производства компании ZETLAB (г. Зеленоград, Россия) [22]. Измерения проводились при частоте

дискретизации 5000 Гц. Всё оборудование, в том числе анализатор спектра, было запитано от аккумулятора и располагалось в кабине оператора катка. Регистрация показаний датчиков включалась при приближении вибрационного катка к экспериментальному участку за несколько метров и останавливалась, когда каток съезжал с исследуемого участка.



Рис.3. Измерения вертикальных перемещения вальца катка DM-58 лазерным датчиком BAUMER OADM 13U6480/S35A

Используя установку динамического нагружения ZORN ZFG 3.0 [23], фиксировались значения динамического модуля деформации грунта E_{vd} после каждого прохода катка DM-58.

Измерение значений E_{vd} осуществлялось после окончания каждого прохода катка в пяти точках (рис.4) в пределах следа вальца и задних колёс.

Первые две точки брались на следе от левой пары колес, третья точка - по центру следа вальца, а четвёртая и пятая точки - по следу от правой пары колёс.

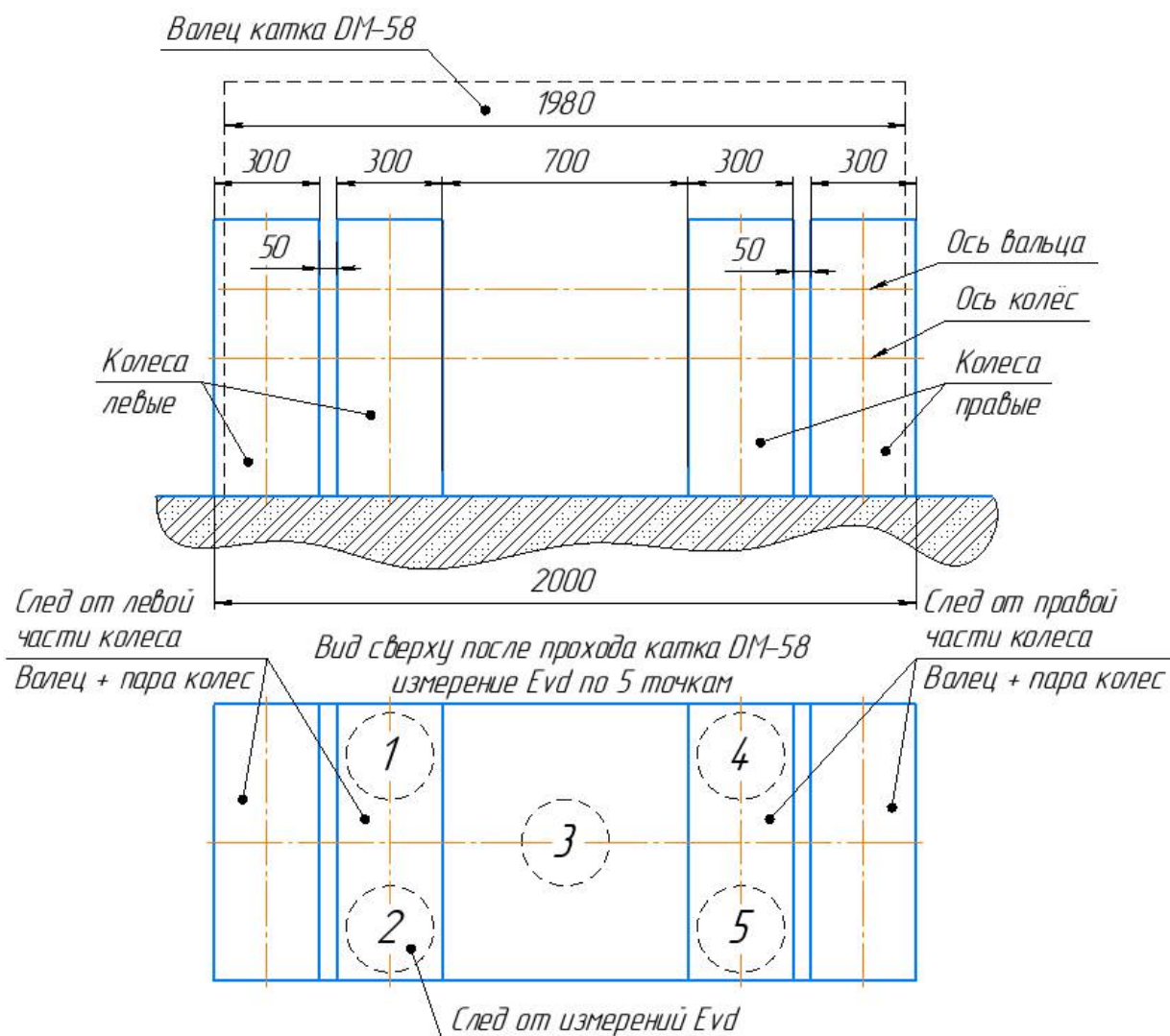


Рис.4. Схема измерений динамического модуля деформации на следе катка E_{vd}

Влажность грунта в пробах, отобранных на глубине 0,15 и 0,3 метра (в соответствии с ГОСТ 5180–2015 [24]) составила 5...6,8 %.

3. Результаты

В процессе экспериментальных исследований, работы выполнялись на двух участках с одинаковыми грунтовыми условиями. Анализ данных (рис.5 и рис.6), показывает, что значения E_{vd} , измеренные на следах от пневмоколес (точки № 1-2 и 4-5 на рис.4) имеют одинаковый характер изменения, но существенно отличаются от значений E_{vd} , измеренных в зоне воздействия только вальца (точка № 3 на рис. 4). Однако с учетом того, что ширина следа от пневмоколес со-

ставляет около 70 % от ширины вальца (ширины всей полосы уплотнения), было принято решение оценивать результат уплотнения после каждого прохода комбинированного катка усреднением значением E_{vd} , измеренных на следах от пневмоколес (рис.7).

Результаты измерений размаха вертикальных колебаний вибровальца катка ДМ-58 в процессе установившихся вибраций (после применения технологии цифровой фильтрации сигналов) приведены на рис.8.

Результаты измерений вертикальных ускорений рамы катка ДМ-58 в процессе уплотнения грунта при движении с установившейся вибрацией (после применения технологии цифровой фильтрации показаний акселерометра) приведены на рисунках (рис. 9 и 10).

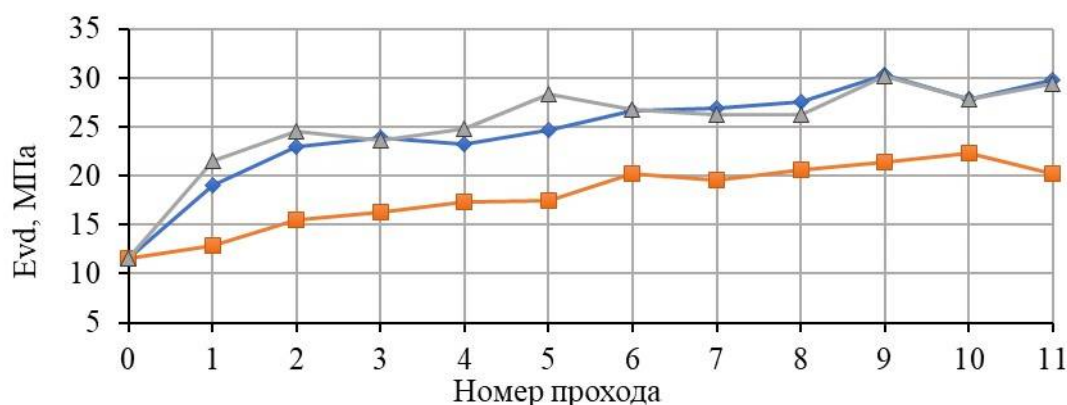


Рис.5. График изменения динамического модуля деформации грунта E_{vd} при уплотнении вибрационным комбинированным катком DM-58 на участке №1: ▲ - среднее по левому следу пневмоколёс; ◆ - среднее по правому следу пневмоколёс; ■ – среднее по середине следа вальца катка

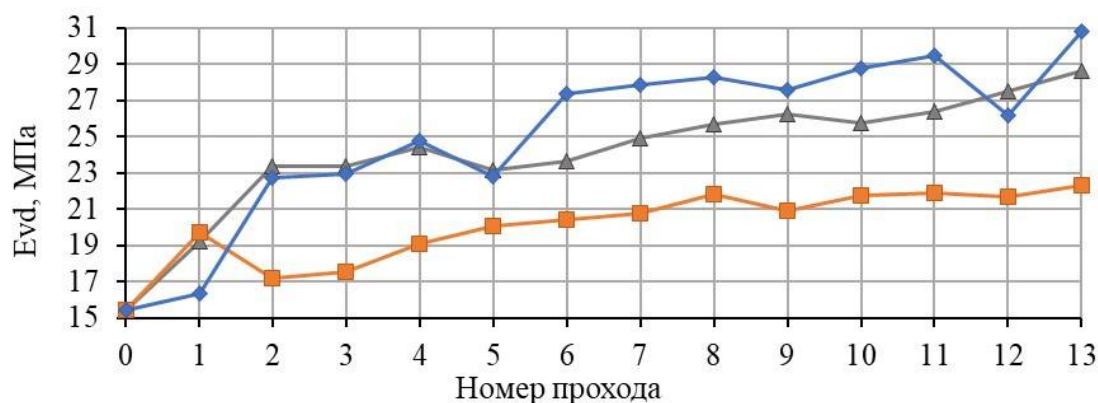


Рис.6. График изменения динамического модуля деформации грунта E_{vd} при уплотнении вибрационным комбинированным катком DM-58 на участке №2: ▲ - среднее по левому следу пневмоколёс; ◆ - среднее по правому следу пневмоколёс; ■ – среднее по следу вальца катка

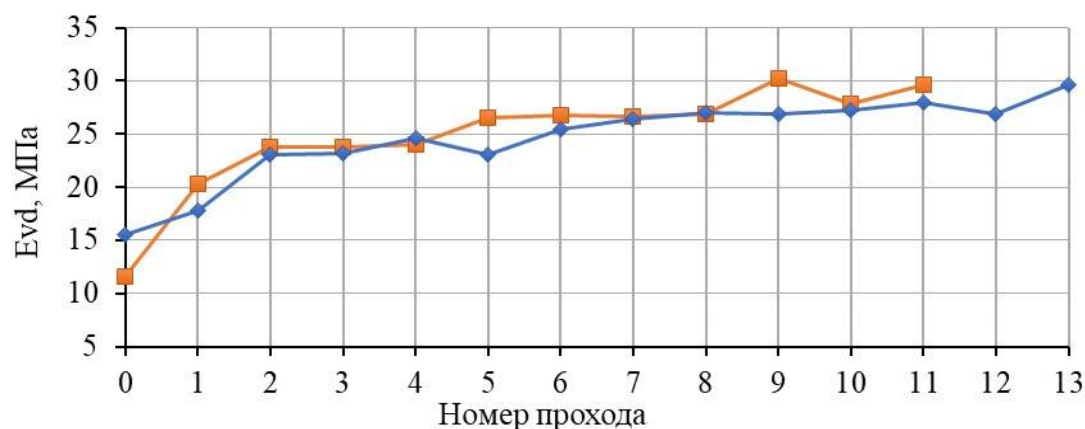


Рис.7. График изменения динамического модуля деформации E_{vd} по следам пневмоколёс вибрационного комбинированного катка DM-58: ■- среднее по левому и правому следу пневмоколёс на участке №1; ◆ - среднее по левому и правому следу пневмоколёс на участке №2.

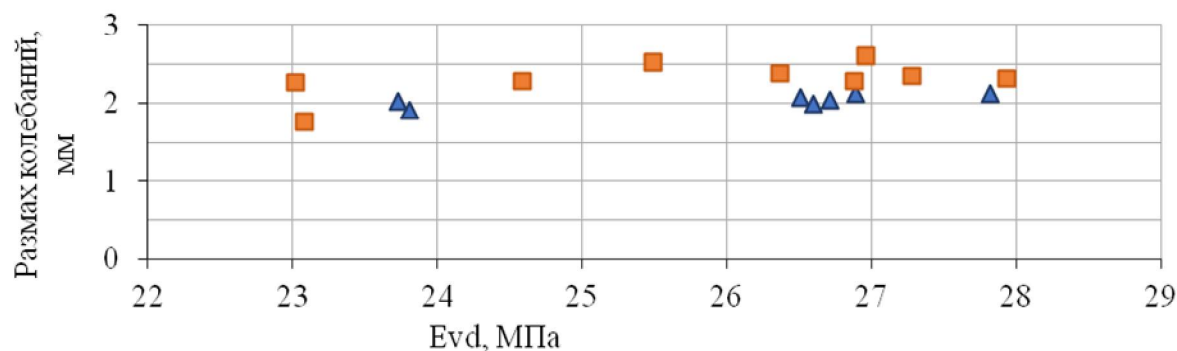


Рис.8. Результаты измерения размаха вертикальных колебаний вальца катка DM-58 в процессе установившейся вибрации при уплотнении грунта:

▲ - участок № 1; ■ –участок № 2

Анализ данных (рис.5 - 10) показывает, что в данных грунтовых и технологических условиях:

1. За 10...12 проходов катка DM-58 достигается значение динамического модуля деформации $E_{vd} = 30$ МПа.

2. Размах вертикальных колебаний вальца катка DM-58 составлял 1,7...2,6 мм.

3. Амплитудные значения ускорений вертикальных колебаний рамы вальца составили, в среднем от +4,5...+7,8 до -4,8...-8,1 м/с^2 .

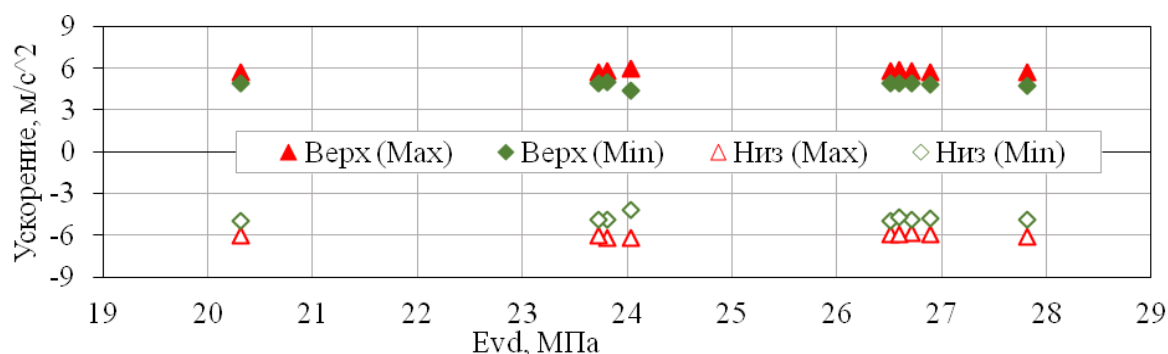


Рис.9. Результаты измерений амплитудных значений вертикальных ускорений рамы катка в процессе установившейся вибрации (участок №1).

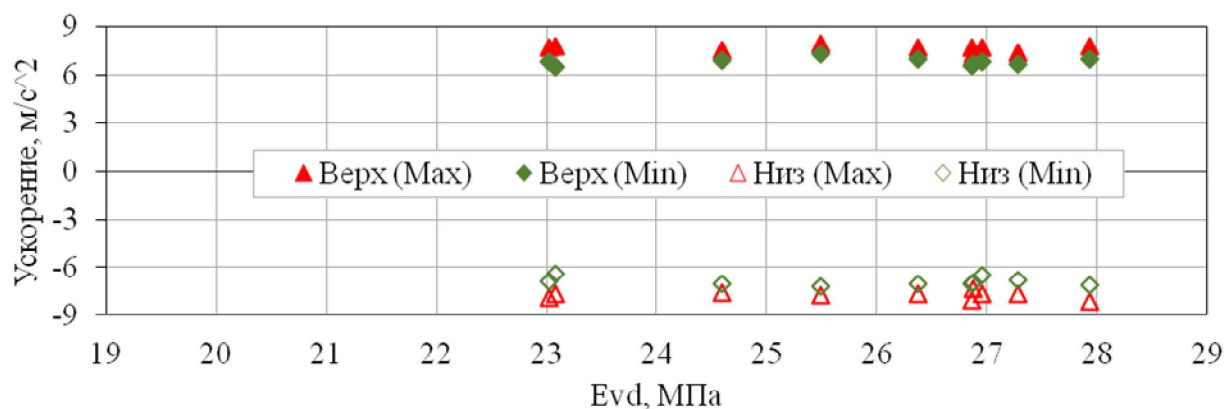


Рис.10.Результаты измерений амплитудных значений вертикальных ускорений рамы катка в процессе установившейся вибрации (участок №2)

4. Обсуждение

Ввиду существенного различия измеренных значений динамического модуля деформации грунта E_{vd} на следе от пневмоколёс и между следами, возникает вопрос планирования точек измерения значений E_{vd} при проведении экспериментальных исследований с катками комбинированного типа. Подобные проблемы возникают и при проведении экспериментальных исследований с грунтовыми вибрационными катками [25 - 29].

Анализ результатов измерения размаха колебаний вальца показывает незначительное увеличение размаха колебаний при увеличении значений E_{vd} . Сравнение результатов, полученных на двух участках, показывает хорошую воспроизводимость данных. Результаты ранее проведенных исследований с вибрационным грунтовым катком согласуются с данными, полученными при экспериментальных исследованиях с катком DM-617 [25, 26]. Экспериментальные исследования с катком DM-617 показывали слабую зависимость размаха колебаний вальца от значений E_{vd} . В дальнейших исследованиях целесообразно расширить диапазон изменения значений E_{vd} и увеличить количество повторности испытаний для повышения точности оценки.

Анализ результатов измерения ускорений вертикальных колебаний рамы вальца показывает, что диапазоны изменения ускорений при различных повторах не перекрываются между собой. В то же время сами диапазоны изменения значений ускорений на каждом участке сравнительно узкие, а средние значения вертикальных ускорений отличаются на 25%, что можно считать удовлетворительным при подобных исследованиях.

5. Заключение

Проведённые экспериментальные исследования позволили оценить технологические возможности катка DM-58 при уплотнении песчано-гравелистого грунта в реальных условиях производства работ. Данная информация представляет интерес и для строителей, применяющих вибрационные катки, и

для производителя данных катков, поскольку в известных исследованиях результаты оценки уплотняющей способности катка DM-58 не встречались.

Полученные экспериментальные значения размаха вертикальных колебаний вальца и ускорений вертикальных колебаний рамы вальца катка DM-58 позволяют расширить перечень моделей катков и грунтовых условий, в которых возможно осуществлять верификацию математических моделей взаимодействия элементов вибрационного катка между собой и с уплотняемым грунтом. Таким образом, возможно проведение верификации математических моделей уплотнения грунта как на промежуточных стадиях (сравнивая расчётные характеристики колебаний рамы и вальца вибрационного катка с экспериментальными значениями), так и по результирующим значениям изменения характеристик грунта после каждого прохода вибрационного катка.

При анализе результатов измерения размаха вертикальных колебаний вальца было выявлено, что в эксперименте фактическая частота колебаний составила 25...30 Гц, а не 40 Гц, как заявлено в технических характеристиках катка DM-58. При таком снижении частоты, вынуждающая сила колебаний уменьшится приблизительно в 1,7 раза. В последующих работах целесообразно перед началом экспериментов сначала убедиться, что машина исправна и работает на заданных частотах колебаний вальца, и только после этого проводить эксперименты. Также вышеописанную особенность необходимо учитывать при использовании результатов, приведенных в данной статье, при верификации математических моделей. Производителям же вибрационных катков целесообразно оснащать катки датчиками частоты колебаний вибровозбудителя. Это необходимо для своевременного обнаружения снижения частоты колебаний вальца и проведения необходимых регулировочных или ремонтных работ с вибрационным катком. Снижение частоты колебаний вибровозбудителя вследствие уменьшения оборотов двигателя, нарушения регулировки гидронасоса вибровозбудителя или увеличения утечек в конту-

ре вибровозбудителя приводит к существенному уменьшению вынуждающей силы вибровозбудителя катка, ухудшению уплотняющей способности и снижению качества уплотнения грунта после совершения заданного числа проходов.

При проведении экспериментальных исследований и обработке их результатов важное значение имеет опыт проведения подоб-

ных работ, знание особенностей конструкции катка, использования датчиков и внимательность. В частности, недостаточный опыт и квалификации участников исследований не позволили получить результаты измерения ускорений вертикальных колебаний вальца катка, а также результатов на первых проходах.

Список литературы

1. Anderegg R., Dominik A von Felten., Kaufmann K. Compaction Monitoring Using Intelligent Soil Compactors // *Geotechnical Engineering in the Information Technology Age*. 2006. pp. 41–46.

2. Костельов М.П. Функциональные достоинства и недостатки виброкатков для уплотнения асфальтобетона // Каталог-справочник «Дорожная техника и технологии (ДТТ)». 2009. С. 42-52.

3. Пиковский Я.М. Полосин-Никитин С.М., Вошинин Н.П., Баловнев В.И. Дорожные машины и оборудование. Машины и заводы для постройки дорожных покрытий. М.: Машгиз. 1960. С. 604.

4. Руководство по уплотнению почвы. Дорожно-строительная машина CAT [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.cat.com/ru_RU/articles/support/paving-application-guides1.html (дата обращения 12.05.2024).

5. Костельов М.П., Никольский Ю.Е., Шестопалов А.А., Уплотнение и укладка. Теория и практика Dynapac. 2008. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://m.eruditor.one/file/4125585/> (дата обращения 16.05.2024).

6. Костельов М.П. Опять о качестве и эффективности уплотнения различных грунтов современными виброкатками // Каталог-справочник «Дорожная техника и технологии (ДТТ)». 2008. С. 12-19.

7. Костельов М.П. Возможность и эффективность уплотнения виброкатками грунтов различного типа и состояния // Туристический навигатор. 2012. № 14(40). С. 60-71.

8. СП 34.13330.2021. Автомобильные

References

1. Anderegg R., Dominik A. von Felten., Kaufmann K. Compaction Monitoring Using Intelligent Soil Compactors. *Geotechnical Engineering in the Information Technology Age*. 2006. 41–46 p.

2. Kostelov M.P. *Funktsionalnie dostoinstva i nedostatki vibrokatkov dlya uplotneniya asfaltobetona. Katalog-spravochnik «Dorojnaya texnika i texnologii (DTT)»* [Functional advantages and disadvantages of vibratory rollers for asphalt concrete compaction]. Saint-Petersburg, ID «Slavutich», 2009. Pp. 42-52 p. (In Russia)

3. Pikovskiy Ya.M. Polosin-Nikitin S.M., Voshinin N.P., Balovnev V.I. *Dorojnie mashini i oborudovanie*. [Road vehicles and equipment]. Moscow, Mashgiz. 1960 (In Russian)

4. *Rukovodstvo po uplotneniyu pochvi. Do-rojno-stroitel'naya mashina CAT* [A guide to soil compaction. CAT Road Construction Machine]. Available at: https://www.cat.com/ru_RU/articles/support/paving-application-guides1.html (In Russian)

5. Kostelov M.P., Nikolskiy Yu.E., Shestopalov A.A., *Uplotnenie i ukladka. Teoriya i praktika Dynapac* [Sealing and laying. Theory and practice Dynapac]. Available at: <https://m.eruditor.one/file/4125585/> (In Russia)

6. Kostelov M.P. *Opyat o kachestve i effektivnosti uplotneniya razlichnix gruntov sovremennimi vibrokatkami* [Again, about the quality and effectiveness of compaction of various soils with modern vibrating rollers]. *Katalog-spravochnik «Dorojnaya texnika i texnologii (DTT)»*, 2008, pp. 12-19 p. (In Russian)

7. Kostelov M.P. *Vozmojnost i effektivnost uplotneniya vibrokatkami gruntov razlichnogo tipa i sostoyaniya* [The possibility

дороги. утв. и введ. в действие Приказом Минстроя России от 09.02.2021 N 53/пр. введ. 10.08.2021. 309 с.

9. Козлов, А. В. Проблемы интерпретации результатов штамповых испытаний при контроле качества уплотнения грунтов земляного полотна и оснований дорожных одежд // Полевые и лабораторные методы исследования грунтов - проблемы и решения: Мат. Общеросс. научно-практич. конф. Москва. 2019. С. 92-101

10. ГОСТ Р 59866-2022. Дороги автомобильные общего пользования. Показатели деформативности конструктивных слоев дорожной одежды из несвязных материалов и грунтов земляного полотна. Утв. и Введ. В действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 10 марта 2022 г. № 125-ст. 38 с.

11. Xu Z. Real-time determination of sandy soil stiffness during vibratory compaction incorporating machine learning method for intelligent compaction // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2022. Т. 14. №. 5. С. 1609-1625.

12. Бурый Г.Г. Методика обоснования режимных параметров вибрационных катков с учетом массы уплотняемого грунта в зоне активного действия вибрации // Современные научные исследования: актуальные проблемы и тенденции: Сб. тр. Междунар. научно-практич. конф. Омск: Омский институт водного транспорта (филиал) ФГБОУ ВО «Новосибирская государственная академия водного транспорта», 2014. С. 47-55.

13. Беляев А.В, Беляева А.Г. Проектирование машин для земляных работ. Иркутск: Иркутский государственный технологический университет, 2015. 286 с.

14. Siminiati D., Hren D. Simulation on vibratory roller-soil interaction // Advanced engineering. 2008. Т. 2. №. 1. С. 111-120.

15. 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.

16. Van Susante P.J., Mooney M.A. Cap-

and effectiveness of compaction by vibrating rollers of soils of various types and conditions]. *Turisticheskij navigator*, 2012. No. 14(40), pp. 60-71 (In Russian)

8. SP 34.13330.2021. *Avtomobilnie dorogi. utv. i vved. v deystvie Prikazom Ministroya Rossii ot 09.02.2021 N 53/pr. vved. 10.08.2021. 309 p.* (In Russian)

9. Kozlov A.V. *Problemy interpretatsii rezultatov shtampovix ispitaniy pri kontrole kachestva uplotneniya gruntov zemlyanogo polot-na i osnovaniy dorojnix odejd* [The problem and interpretation of the results of stamp tests in quality control of soil compaction of the roadbed-based on road clothing]. In: *Field and laboratory soil investigation - problems and solutions -2019*. Moscow, pp. 92-101. (In Russian)

10. GOST R 59866-2022. *Dorogi avtomobilnie obshego polzovaniya. Pokazateli deformativnosti kon-struktivnix sloev dorojnoy odejdi iz nesvyaznix materialov i gruntov zemlyanogo polotna. Utv. i vved. v deysvie prikazom Federalnogo agentstva po texnicheskemu regulirovaniyu i metrologii*. 2022. No. 125-st. 38 p. (In Russian)

11. Xu Z. Real-time determination of sandy soil stiffness during vibratory compaction incorporating machine learning method for intelligent compaction. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2022, Vol.14, No. 5, pp. 1609-1625.

12. Buriy G.G. *Metodika obosnovaniya rejim-nix parametrov vibracionnix katkov s uchetom massi uplotnyaemogo grunta v zone aktivnogo deystviya vibrasii* [Methodology for substantiating the operating parameters of vibrating rollers, taking into account the mass of compacted soil in the active vibration zone]: In: *Sovremennye nauchnye issledovaniya: aktualnie problemi i tendensii: Sbornik trudov Mejdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferensii, Omsk, Omskiy institut vodnogo transporta (filial) FGBOU VO “Novosibirskaya gosudarstvennaya akademiya vodnogo transporta”*, 2014, pp. 47-55 (In Russian)

13. Belyaev A.V, Belyaeva A.G. *Proektirovanie mashin dlya zemlyanix rabot* [Designing machines for earthworks]. Irkutsk, Irkutsk State Technological University, 2015. 286 p.

turing nonlinear vibratory roller compactor behavior through lumped parameter modeling // *Journal of engineering mechanics*. 2008. T. 134. №. 8. С. 684-693.

17. Shen P. Dynamic characteristics of the intelligent compactor model with adjustable vibration modes // *International Conference on Transportation Engineering*. 2009. С. 2322-2327.

18. Носов С.В. Методы совершенствования технологий уплотнения дорожных грунтов на основе развития их реологии // *Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура*. 2012. №. 4. С. 41-52.

19. Каток ДМ-58 комбинированный. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dormashina.ru/produkciya/dorozhnye-katki-dm/kombinirovannye/dm58.html> (дата обращения 10.06.2024).

20. Высокочувствительный датчик вибрации АП99-500. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://pribory-si.ru/catalog/seysmopreobrazovateli/vysokochuvstvitelnyy-vibropreobrazovatel-ap99-500_5283/ (дата обращения 10.06.2024).

21. Лазерный датчик BAUMER OADM 13U6480/S35A. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.datasheets360.com/pdf/-1124803611755666485> (дата обращения 10.06.2024).

22. Анализатор спектра ZET 017-U8. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://zetlab.com/shop/izmeritelnoe-oborudovanie/analizatory/analizator-spektra-zet017-u8/> (дата обращения 12.06.2024).

23. Средства динамического нагружения ZORN ZFG 3.0 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://zfg-3000.ru/catalog/4/> (дата обращения 12.06.2024).

24. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. Москва: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2015. 23 с.

25. Денисова Т.А., Тюремнов И.С. Исследование вибробезопасности оператора вибрационного катка ДМ-617 при уплотнении грунта // *Транспортные и транспортно-*

(In Russian)

14. Siminiati D., Hren D. Simulation on vibratory roller-soil interaction. *Advanced engineering*, 2008, Vol. 2, No. 1, pp. 111-120.

15. Shabanova G.I., Savelev S.V., Buriy G.G. *Matematicheskoe opisanie kolebatelnoy sistemi “vibratsionniy rabochiy organgrunt”* [Mathematical description of the vibrational system “vibrating working body-ground”]. *Vestnik Sibirskoy gosudarstvennoy avtomobilno-dorozhnoy akademii*, 2013, No.3(31), pp. 102-107 (In Russian)

16. Van Susante P. J., Mooney M. A. Capturing nonlinear vibratory roller compactor behavior through lumped parameter modeling. *Journal of engineering mechanics*, 2008, Vol. 134, No. 8, pp. 684-693.

17. Shen P. Dynamic characteristics of the intelligent compactor model with adjustable vibration modes. In: *International Conference on Transportation Engineering*, 2009, pp. 2322-2327.

18. Nosov S.V. *Metodi sovershenstvovaniya tekhnologiy uplotneniya dorozhnix gruntov na osnove razvitiya ix reologii* [Methods of improving technologies for compaction of road soils based on the development of their rheology]. *Nauchniy vestnik Voronejskogo gosudarstvennogo arxitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitelstvo i arxitektura*, 2012, No. 4, pp. 41-52 (In Russian)

19. Каток ДМ-58 комбинированный [Roller DM-58 combined]. Available at: <https://dormashina.ru/produkciya/dorozhnye-katki-dm/kombinirovannye/dm58.html> (In Russian)

20. *Visokochuvstvitelnyy datchik vibrasii AP99-500* [Highly sensitive vibration sensor AP 99-500]. Available at: <https://www.datasheets360.com/pdf/-1124803611755666485> (In Russian)

21. *Lazerniy datchik BAUMER OADM 13U6480/S35A* [Laser sensor BAUMER OADM 13U6480/S35A]. Available at: <https://www.datasheets360.com/pdf/-1124803611755666485> (In Russian)

22. *Analizator spektra ZET 017-U8* [The ZET 017-U8 spectrum analyzer]. Available at: <https://zetlab.com/shop/izmeritelnoe-oborudovanie/analizatory/analizator-spektra->

технологические системы: Мат. Междунар. научно-технич. конф., Тюмень, 18 апреля 2019 г. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2019. С. 79-83.

26. Ефимов С.С., Шорохов Д.А., Тюремнов И.С., Краюшкин А.С. Экспериментальное исследование уплотнения грунта вибрационным катком HAMM 3411 // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях: Мат. Междунар. научно-практ. конф. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2021. С. 106-112.

27. Тюремнов И.С., Иванов С.Н., Краюшкин А.С. Результаты экспериментальных исследований ускорений колебаний вибровальца катка DM-617 с использованием технологии цифровой обработки сигнала // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2020. Т. 17. №. 2 (72). С. 182-195.

28. Тюремнов И.С., Морев А.С., Фурманов Д.В. Экспериментальные исследования вертикальных перемещений и ускорений колебаний вальца вибрационного катка DM-617 при уплотнении грунта // Проблемы машиноведения: Мат. IV Междунар. научно-технич. конф., Омск, 17–19 марта 2020 г. Омск: Омский государственный технический университет, 2020. С. 121-128.

29. Tyuremnov I.S., Morev A.S., Krayushkin A.S. Justification of chosen values of the weight coefficients of the compaction value for continuous compaction control systems for vibration rollers // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2021. T. 1791. №. 1. C. 10.

zet017-u8/ (In Russian)

23. Sredstva dinamicheskogo nagrujeniya ZORN ZFG 3.0 [Dynamic loading tools ZORN ZFG 3.0] Available at: <https://zfg-3000.ru/catalog/4/> (In Russia)

24. GOST 5180-2015. *Grunti. Metodi laboratornogo opredeleniya fizicheskikh xarakteristik*. Moskva: Mezhgosudarstvenniy so-vet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii, 2015. 23 p. (In Russian)

25. Denisova T.A., Tyuremnov I.S. *Issledovanie vibrobezopasnosti operatora vibratsionnogo katka DM-617 pri uplotnenii grunta* [Investigation of the vibration safety of the operator of the DM-617 vibrating roller during soil compaction]. In: *Transportnie i transportno-tekhnologicheskie sistemi: Materiali Mejdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Tyumen*. Tyumenskiy industrialniy universitet, 2019. 79-83 p. (In Russia)

26. Efimov S.S., Shoroxov D.A., Tyuremnov I.S., Krayushkin A.S. *Eksperimentalnoe issledovanie uplotneniya grunta vibratsionnim katkom HAMM 3411* [Experimental study of soil compaction with a HAMM 3411 vibrating roller]. In: *Energo-resursosberegayushie tekhnologii i oborudovanie v dorojnoy i stroitel'noy otraslyax: Materiali mejdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Belgorod: Belgorodskiy gosudarstvenniy tekhnologicheskiiy universitet im. V.G. Shuxova*, 2021, pp. 106-112 (In Russian)

27. Tyuremnov I.S., Ivanov S.N., Krayushkin A.S. *Rezultati eksperimentalnix issledovaniy uskoreniy kolebaniy vibro-vals katka DM-617 s ispolzovaniem tekhnologii sifrovoy obrabotki signala* [Results of experimental studies of vibration accelerations of the DM-617 roller roller using digital signal processing technology]. *Vestnik Sibirskoy gosudarstvennoy avtomobilnodorojnoy akademii*, 2020, Vol. 17, No. 2 (72), pp. 182-195 (In Russian)

28. Tyuremnov I.S., Morev A.S., Furmanov D.V. *Eksperimentalnie issledovaniya ver-tikalnix peremesheniy i uskoreniy ko-lebaniy vals vibratsionnogo katka DM-617 pri uplotnenii grunta* [Experimental studies of vertical displacements and accelerations of vibrations of the DM-617 vibrating roller during

- † soil compaction]. In: *Problemi mashinovedeniya: Materiali IV Mejdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Omsk. Omsk, Omskiy gosudarstvenniy tekhnicheskij universitet, 2020*, pp. 121-128 (In Russian)
- † 29. Tyuremnov I.S., Morev A.S., Krayushkin A.S. Justification of chosen values of the weight coefficients of the compaction value for continuous compaction control systems for vibration rollers. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, Vol. 1791, No.1, pp. 10.