Научная статья УДК 624.138.22: 51-7 DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-202-216 EDN: BSOEFX



МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВИБРАЦИОННОГО КАТКА С УПЛОТНЯЕМЫМ ГРУНТОМ

И.С. Тюремнов 🖂, Д.А. Шорохов

Ярославский государственный технический университет, г. Ярославль, Россия ⊠ ответственный автор tyuremnovis@yandex.ru

аннотация

Введение. Вибрационные катки являются наиболее распространенным средством уплотнения грунтов в строительстве. Характер развития напряжений на поверхности контакта вальца с грунтом зависит от технических характеристик вибрационного катка (массы вальца, массы рамы вальца, частоты и вынуждающей силы колебаний, количества и характеристик амортизаторов вальца) и свойств грунта. Материалы и методы. Моделирование взаимодействия вибрационного катка с уплотняемым грунтом осуществлялось с использованием трехмассной реологической модели системы «рама – валец – грунт». Дифференциальные уравнения движения масс в режимах контакта и отрыва от грунта решались численно. Для определения численных значений времени нагружения (увеличения контактных напряжений от нуля до максимального значения) и времени разгрузки (уменьшения контактных напряжений от максимального значения до нуля), а также максимальной силы реакции грунта на реологической модели был проведен вычислительный эксперимент. В качестве независимых параметров вибрационного катка использовалась масса вибровальцового модуля (масса, приходящаяся на переднюю ось) и относительная вынуждающая сила. В качестве независимых параметров грунта были выбраны коэффициенты упругого и вязкого сопротивления грунта. Общее количество сочетаний факторов равнялось 192. Значения времени нагружения и разгрузки грунта, а также максимальной силы реакции грунта определялись по осциллограммам изменения силы реакции грунта во времени.

Результаты. С использованием программы STATISTICA получены уравнения регрессии для расчета численных значений времени нагружения и разгрузки грунта, а также максимальной силы реакции грунта и соответствующие значения коэффициентов достоверности множественной аппроксимации.

Обсуждение и заключение. Реологическая модель воспроизводит асимметричный характер изменения контактных напряжений при уплотнении грунта вибрационным катком, наблюдающимся в экспериментальных осциллограммах напряжений, полученных при полевых экспериментальных исследованиях. Полученные результаты имеют большое значение для расчета глубины распространения напряжений в грунте и распределения напряжений в грунте после прохода вибрационного катка с использованием волнового подхода к описанию распространения напряжений в грунте. В дальнейшем целесообразно проведение вычислительного эксперимента с расширенным перечнем независимых параметров катка, включающих частоту колебаний.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: грунт, уплотнение, вибрация, каток вибрационный, моделирование реологическое, время нагружения, время разгрузки, сила реакции грунта, анализ статистический, уравнения регрессии

БЛАГОДАРНОСТИ: авторы выражают благодарность редактору и рецензентам данной статьи.

Статья поступила в редакцию 28.12.2023; одобрена после рецензирования 11.03.2024; принята к публикации 22.04.2024.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Тюремнов И.С., Шорохов Д.А. Моделирование взаимодействия вибрационного катка с уплотняемым грунтом // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 2. С. 202-216. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-202-216

© Тюремнов И.С., Шорохов Д.А., 2024



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.



Origin article DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-202-216 EDN: BSOEFX

VIBRATING ROLLER WITH COMPACTED SOIL INTERACTION MODELLING

Ivan S. Tyuremnov ⊠, Dmitrii A. Shorohov Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia ⊠ corresponding author tyuremnovis@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. Vibrating rollers are the most common means of compacting soils in construction. The nature of stress development on the contact surface of the roller with the ground depends on the technical characteristics of the vibrating roller (the mass of the roller, the mass of the roller frame, the frequency and driving force of vibrations, the number and characteristics of the roller shock absorbers) and the properties of the soil.

Materials and methods. Simulation of the interaction of a vibrating roller with compacted soil was carried out using a three-mass rheological model of the frame-roller-soil system. Differential equations of mass motion in contact and separation modes were solved numerically. To determine the numerical values of the loading time (increase in contact stresses from zero to the maximum value) and the unloading time (decrease in contact stresses from the maximum value) and the unloading time (decrease in contact stresses from the maximum value) and the unloading time (decrease in contact stresses from the maximum value) and the unloading time (decrease in contact stresses from the maximum value to zero), as well as the maximum reaction force of the soil, a computational experiment was conducted on a rheological model. The mass of the vibrating roller module (the mass of the front axle) and the relative driving force were used as independent parameters of the vibrating roller. The coefficients of elastic and viscous resistance of the soil were chosen as independent parameters of the soil. The total number of combinations of factors was 192. The values of the time of loading and unloading of the soil, as well as the maximum strength of the soil reaction, were determined by oscillograms of changes in the strength of the soil reaction over time.

Results. Using the STATISTICA program, regression equations, to calculate the numerical values of the loading and unloading time of the soil, as well as the maximum reaction force of the soil and the corresponding values of the reliability coefficients of the multiple approximation, were obtained.

Discussion and conclusion. The rheological model reproduces the asymmetric nature of changes in contact stresses during soil compaction by a vibrating roller, observed in experimental stress oscillograms obtained during field experimental studies. The results obtained are important for calculating the depth of stress propagation in the ground and the distribution of stresses in the ground after the passage of a vibrating roller using a wave approach to describing stress propagation in the ground. In the future, it is advisable to conduct a computational experiment with an expanded list of independent parameters of the roller, including the oscillation frequency.

KEYWORDS: soil, compaction, vibration, vibrating roller, rheological modelling, loading time, unloading time, soil reaction force, statistical analysis, regression equations

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

The article was submitted 28.12.2023; approved after reviewing 11.03.2024; accepted for publication 22.04.2024.

All authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Tyuremnov I.S., Shorohov D.A. Vibrating roller with compacted soil interaction modelling. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2024; 21 (2): 202-216. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-202-216

© Tyuremnov I.S., Shorohov D.A., 2024



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



введение

Качественное уплотнение грунтов оснований инженерных сооружений, возведенных на грунтах и грунтовых конструктивных слоев инженерных сооружений (например, автомобильных дорог), является важнейшей составляющей обеспечения их прочности, долговечности и устойчивости к воздействию погодно-климатических факторов¹. Вибрационные катки получили наибольшее распространение при уплотнении грунтов в автодорожном, железнодорожном, гидротехническом, промышленном и гражданском строительстве.

Несмотря на многолетний опыт производства и применения вибрационных катков, до настоящего времени не существует единого мнения о требуемых характеристиках вибрационных катков, оценке технологических возможностей вибрационных катков [1, 2] и назначению режимов работы вибрационных катков при уплотнении грунтов в различных технологических ситуациях. Это связано со сложностью и недостаточной изученностью процессов, происходящих в грунтах при их уплотнении вибрационными катками; сложными процессами взаимодействия элементов вибрационного катка между собой и с уплотняемым грунтом в процессе уплотнения грунта с постоянно изменяющимися от прохода к проходу характеристиками; многообразием видов грунтов и технологических ситуаций, в которых проводятся работы по уплотнению [2].

Для решения задач обоснования технических характеристик вибрационных катков и оценки их технологических возможностей по уплотнению грунтов в конкретных условиях производства работ необходима разработка методологии определения влияния технических характеристик вибрационных катков и режимов их работы на результаты уплотнения грунта в конкретных условиях. В рамках разработки такой методологии предлагается разделить все процессы, происходящие при взаимодействии вибрационного катка с уплотняемым грунтом условно на три фазы²: развитие контактных напряжений на поверхности контакта вальца с грунтом; распространение напряжений по глубине грунта и развитие деформаций на различных глубинах грунта под действием напряжений.

Поскольку во время движения вибрационного катка по каждой точке поверхности грунта под вальцом наносится несколько воздействий различной интенсивности (с различными амплитудными значениями амплитудных контактных напряжений) (рисунок 1), для дальнейшего исследования будем рассматривать только одно воздействие с максимальными значениями амплитудных контактных напряжений (см. рисунок 1), которое будем называть «характерным циклом нагружения». Данное характерное воздействие важно, поскольку реализуемая необратимая деформация на 90% определяется значением действующего напряжения в грунте и только на 10% продолжительностью его действия³.

Характер развития напряжений на поверхности контакта вальца с грунтом зависит от технических характеристик вибрационного катка (массы вальца, массы рамы вальца, частоты и вынуждающей силы колебаний, диаметра вальца, количества и характеристик амортизаторов вальца, скорости движения) и свойств грунта (вида грунта, плотности грунта, толщины слоя и др.). Поскольку вибрационный каток представляет собой многомассную колебательную систему, взаимодействующую с деформируемым ограничителем (грунтом), то для моделирования процессов в такой системе целесообразно применять метод реологического моделирования. В методе реологического моделирования исследуется поведение объектов с сосредоточенными массами под действием внешних сил при наличии связей между объектами, моделирующих упругие, вязкие и пластические эффекты. При анализе взаимодействия вибрационного катка с уплотняемым грунтом различными исследователями применялись различные варианты реологических моделей.

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

² Тюремнов И.С. Обоснование подходов для разработки методики прогнозирования технологических возможностей мобильных грунтоуплотняющих машин виброударного действия // Интерстроймех-2021 [Электронный ресурс]: сборник докладов XXV Международной научно-технической конференции (Москва, 5–7 октября 2021 г.) / редакционная коллегия: Б.Г. Ким, Е.М. Кудрявцев Р.Р.Ш. М.: Издательство МИСИ – МГСУ, 2021. С. 94–102. https://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/46043/

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



Рисунок 1 – Изменение контактных напряжений во времени для «характерного цикла воздействия» вальца вибрационного катка при движении над выделенной точкой грунта Источник: составлено авторами.

Figure 1 – The change in contact stresses over time for the 'characteristic impact cycle' of the vibrating roller when moving over a selected point of the soil Source: compiled by the authors.

Одномассные^{4,5} [3, 4, 5] модели позволяют учитывать только массу вальца^{6,7} [3, 4] или вальца с пригрузом от рамы вальца [5]. В двухмассных реологических моделях⁸ [6, 7, 8, 9, 10, 11] появляется возможность учета массы вальца и грунта или вальца и его рамы. В трехмассных реологических моделях [12, 13,14] учитывается масса вальца, масса рамы вальца и масса уплотняемого грунта (присоединенная масса грунта). При моделировании свойств грунта применяются как сравнительно простые модели типа Фойгта [5, 12, 13, 14, 15, 16, 17], так и более сложные⁹ [18, 19, 20, 21, 22, 23].

Схема Фойгта является одной из наиболее распространенных при реологическом моделировании взаимодействия ударно-вибрационных машин с уплотняемым грунтом. Данная схема применяется при моделировании вибрационных катков [14, 16, 17], виброплит [11], при исследовании колебаний поверхности фундаментов, опирающихся на однородные и слоистые упругие основания¹⁰ [24, 25, 26]. В целом модель Фойгта сочетает в себе сравнительную простоту и воспроизведение характерного поведения грунта при динамических нагрузках [27, 28]. Например, в работе C.Dobrescu [27] отмечается, что на основании многочисленных экспериментов, проведенных не менее чем с 25 категориями грунтов (как с применением химических стабилизаторов, так и без стабилизаторов), был сделан вывод о том, что динамический отклик вибрационного катка при взаимодействии с грунтом в 90% случаев соответствует линейной вязко-упругой модели Фойгта.

¹⁰ Wolf J.P. Foundation vibration analysis using simple physical models. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1994.



⁴ Баркан Д.Д., Шехтер О.Я. Теория поверхностного уплотнетния грунтов // Применение вибрации в строительстве. М., 1962. С. 5–26.

⁵ Дудин В.М., Попова Н.Н. Анализ расчетной схемы вибратора на упруго-вязком ограничителе // «Строительные и дорожные машины»: сб. научных трудов Ярославского политехнического института. Ярославль: Ярославский политехнический институт, 1975. С. 11–14.

⁶ Там же.

⁷ Баркан Д.Д., Шехтер О.Я. Теория поверхностного уплотнетния грунтов // Применение вибрации в строительстве. М., 1962. С. 5–26.

⁸ Закирзаков Г.Г., Капустин М.И. Экспериментально-теоретическое определение параметров двухмассной колебательной системы // Рабочие процессы и динамика машин для разработки, уплотнения грунтов и вибрационного формования изделий. Ярославль, 1986. С. 81–86.

⁹ Савельев С.В., Шушубаева М.К. Использование инновационного подхода к моделированию взаимодействия рабочих органов уплотняющих машин с грунтами земляного полотна при строительстве транспортных объектов // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство: сборник материалов IV Национальной научно-практической конференции. Омск, 2021. С. 51–56. https://elibrary.ru/item.asp?id=46355789

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассматривается движение вибрационного катка с постоянной скоростью по слою уплотняемого грунта. Поскольку валец катка постоянно наезжает на новые участки грунта, то примем допущение, что в процессе движения свойства грунта не изменяются на протяжении всего прохода, а на следующем проходе грунт приобретает новые свойства, зависящие от накопленных необратимых деформаций за предыдущий проход. Численные значения деформаций грунта в этом случае не имеют принципиального значения, потому что в рамках принятой методологии¹¹ на этапе развития контактных напряжений основное внимание уделяется исследованию влияния численных значений характеристик катка и свойств грунта на продолжительность нагружения и разгрузки грунта, а также максимальное значение силы реакции грунта на рабочий орган вибрационного катка, что влияет на глубину распространения в грунте волн напряжения с различными значениями во фронте [1]. Учет влияния характеристик катка и свойств грунта на значение накопленных деформаций за проход рассматривается на последующих этапах методологии¹².

Моделирование взаимодействия вибрационного катка с уплотняемым грунтом осуществлялось с использованием трехмассной реологической модели системы «рама – валец – грунт» [29] (рисунок 2). В данной модели валец вибрационного катка совершает колебания между двумя подвижными ограничителями. В качестве верхнего подвижного ограничителя выступает инерционное сопротивление, формируемое массой рамы катка, связанной с вальцом при помощи амортизаторов с упруго-вязкими характеристиками (схема Фойгта). Нижним подвижным ограничителем является деформируемый грунт. Причем связь вальца с грунтом имеет нелинейный характер из-за возможных периодических отрывов вальца от грунта.

Реологическая модель содержит валец катка массой m, раму массой m, ограничивающую перемещение вальца вверх и связанную с вальцом через амортизаторы, моделируемые параллельно установленными элементами упругого и вязкого сопротивления с коэффициентами k, и b, соответственно. Грунт моделировался массой т, моделирующей инерционные сопротивления грунта. Упругие и вязкие характеристики грунта моделировались при помощи параллельно установленных элементов упругого и вязкого сопротивления (схема Фойгта) с коэффициентами, соответственно, k и b. Вопрос обоснования численных значений коэффициентов упругого и вязкого сопротивления грунта k, и b, в зависимости от различных факторов (вида и состояния грунта, скорости нагружения и т.д.) выходит за рамки данного исследования и рассматривался в работах¹³ [11, 22] и др. На основании исследований [12] и [29] значение присоединенной массы грунта m_s рассчитывалось как m = 0,2·m . Значения коэффициентов упругого k, и вязкого b, сопротивлений амортизаторов рамы рассчитывались в зависимости от массы катка по зависимостям, полученным в результате статистической обработки доступных характеристик амортизаторов, применяемых на вибрационных катках.

Реологическая модель позволяет исследовать взаимодействие элементов системы «рама –валец – грунт» как в режиме контакта вальца с грунтом, так и в режимах периодического отрыва вальца от грунта [29].

В режиме контакта вальца с грунтом дифференциальные уравнения движения масс системы «рама – валец – грунт» имеют вид

¹³ Тюремнов И.С. Определение коэффициентов упругого и вязкого сопротивления грунта при его вибрационном уплотнении // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-29: сб. трудов XXIX Междунар. науч. конф.: в 12 т. Т.8. 2016. С. 46–49.



¹¹ Тюремнов И.С. Обоснование подходов для разработки методики прогнозирования технологических возможностей мобильных грунтоуплотняющих машин виброударного действия // Интерстроймех–2021 [Электронный ресурс]: сборник докладов XXV Международной научно-технической конференции (Москва, 5–7 октября 2021 г.) / редакционная коллегия: Б.Г. Ким, Е.М. Кудрявцев Р.Р.Ш. М.: Издательство МИСИ – МГСУ, 2021. С. 94–102. https://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/46043/

¹² Там же.

TRANSPORT, MINING AND MECHANICAL ENGINEERING

Пſ·Q Πŕ·Q Xf XF h br Psinlwti Psinl@t/ Шdд Xd МďД t Xd Fs Ms Q Xs Xs Пs·Q Ďs Ks Ds

Рисунок 2 – Трехмассная реологическая модель системы «рама – валец – грунт» [29]

Figure 2 – Three-mass rheological model of the frame – roller – ground system [29]

$$\begin{pmatrix}
m_f \cdot \ddot{x}_f - b_f \cdot (\dot{x}_d - \dot{x}_f) - k_f \cdot (x_d - x_f) = m_f \cdot g; \\
(m_d + m_s) \cdot \ddot{x}_d + b_s \cdot \dot{x}_d + b_f \cdot (\dot{x}_d - \dot{x}_f) + k_s \cdot x_d + \\
+ k_f \cdot (x_d - x_f) = (m_d + m_s) \cdot g + P \cdot \sin(\omega t); \\
\dot{x}_d = \dot{x}_s; \\
x_d = x_s,
\end{cases}$$
(1)

где \ddot{x}_f — ускорение рамы, м/с²; \ddot{x}_d — ускорение вальца, м/с²; b_f — коэффициент вязкого сопротивления амортизаторов, соединяющих валец с рамой, Hc/м; b_s — коэффициент вязкого сопротивления грунта, Hc/м; \dot{x}_f — вертикальная скорость перемещения рамы, м/с; \dot{x}_d — вертикальная скорость перемещения вальца, м/с; \dot{x}_s — вертикальная скорость перемещения и раму, H/м; k_s — коэффициент упругого сопротивления мортизаторов, соединяющих валец и раму, H/м; k_s — коэффициент упругого сопро-

тивления грунта, H/м; x_f – вертикальная координата рамы, м; x_d – вертикальная координата вальца, м; x_s – вертикальная координата грунта, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; P – вынуждающая сила, H; ω – угловая скорость колебаний вибровозбудителя вальца, рад/с.

В режиме отрыва вальца от грунта дифференциальные уравнения движения масс системы «рама – валец – грунт» имеют вид

$$\begin{cases} m_f \cdot \ddot{x_f} + k_f \cdot (x_d - x_f) + b_f \cdot (\dot{x_d} - \dot{x_f}) = m_f \cdot g; \\ m_d \cdot \ddot{x_d} - k_f \cdot (x_d - x_f) - b_f \cdot (\dot{x_d} - \dot{x_f}) = m_d \cdot g + P \cdot \sin(\omega t); \\ m_s \cdot \ddot{x_s} + k_s \cdot x_s + b_s \cdot \dot{x_s} = m_s \cdot g. \end{cases}$$
(2)



Сила реакции грунта на валец

$$F_s = m_s \cdot \ddot{x}_s + k_s \cdot x_s + b_s \cdot \dot{x}_s - m_s \cdot g.$$
(3)

Условие неприлипания вальца к грунту

$$F_s > 0. \tag{4}$$

Условием перехода от режима отрыва от грунта (системе уравнений (2)) к режиму контакта с грунтом (системе уравнений (1)) является равенство вертикальных координат вальца и поверхности грунта

$$x_d \le x_s. \tag{5}$$

Для численного решения уравнений (1) – (2) была разработана расчетная модель в среде MATLAB Simulink.

Данная реологическая модель воспроизводит основные режимы колебаний вальца вибрационного катка [30]: режим постоянного контакта с грунтом (continuous contact) (рисунок 3), режим частичного отрыва от грунта (partial uplift) (рисунок 4) – Осциллограммы перемещений вальца вибрационного катка и грунта, (рисунок 4), режим двойного прыжка (double jump) (рисунок 5) и более сложные режимы колебаний с кратностью более 1 (рисунок 6).



Рисунок 3 – Осциллограммы перемещений вальца вибрационного катка и грунта, а также силы реакции грунта для характерного цикла нагружения (k_s = 30 MH/m, b_s = 200 кH·c/m, m_d = 1000 кг, m_f = 1000 кг, m_s = 200 кг, ω = 188,4 рад/с, P = 39 200 H, k_f = 2.33 MH/m, b_f = 12,37 кH·c/m, режим постоянного контакта с грунтом (continuous contact) Источник: составлено авторами.

> Figure 3 – Oscillograms of the movements of the roller of the vibrating roller and the soil, as well as the reaction forces of the soil for a characteristic loading cycle (k_s = 30 MN/m, b_s = 200 kN·s/m, m_d = 1000 kg, m_f = 1000 kg, m_s = 200 kg, ω = 188.4 rad/s, P = 39 200 N, k_f = 2.33 MN/m, b_f = 12.37 kN·s/m, mode of continuous contact with the ground (continuous contact)). Source: compiled by the authors.

Source, complied by the author



Рисунок 4 – Осциллограммы перемещений вальца вибрационного катка и грунта, а также силы реакции грунта для характерного цикла нагружения (k_s = 80 MH/м, b_s = 100 кH·c/м, m_d = 1000 кг, m_f = 1000 кг, m_s = 200 кг, ω = 188,4 рад/с, P = 39 200 H, k_f = 2.33 MH/м, b_f = 12,37 кH·c/м, режим частичного отрыва от грунта (partial uplift) Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Oscillograms of the movements of the roller of the vibrating roller and the soil, as well as the reaction forces of the soil for a characteristic loading cycle $(k_s = 80 \text{ MN/m}, b_s = 100 \text{ kN} \cdot \text{s/m}, m_d = 1000 \text{ kg},$ $m_f = 1000 \text{ kg}, m_s = 200 \text{ kg}, \omega = 188.4 \text{ rad/s}, P = 39 200 \text{ N}, k_f = 2.33 \text{ MN/m},$ $b_f = 12.37 \text{ kN} \cdot \text{s/m}, \text{ partial lift-off mode (partial uplift))}$ Source: compiled by the authors.

PART I





Рисунок 5 – Осциллограммы перемещений вальца вибрационного катка и грунта, а также силы реакции грунта для характерного цикла нагружения (k_s = 180 MH/м, b_s = 200 кH·c/м, m_d = 1000 кг, m_t = 1000 кг, m_s = 200 кг, ω = 188,4 рад/с, P = 58 800 H, k_t = 2.33 MH/м, b_t = 12,37 кH·c/м, режим двойного прыжка (double jump) Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Oscillograms of the movements of the roller of the vibrating roller and the soil, as well as the reaction forces of the soil for a characteristic loading cycle $(k_s = 180 \text{ MN/m}, b_s = 200 \text{ kN} \cdot \text{s/m}, m_a = 1000 \text{ kg}, m_r = 1000 \text{ kg}, m_s = 200 \text{ kg}, \omega = 188.4 \text{ rad/s}, P = 58800 \text{ N}, k_r = 2.33 \text{ MN/m}, b_r = 12.37 \text{ kN} \cdot \text{s/m}, 'double jump' mode})$ Source: compiled by the authors.



Рисунок 6 – Осциллограммы перемещений вальца вибрационного катка и грунта, а также силы реакции грунта для характерного цикла нагружения (k_s = 180 MH/m, b_s = 300 кH·c/m, m_d = 1000 кг, m_f = 1000 кг, m_s = 200 кг, ω = 188,4 рад/с, P = 98 кH, k_f = 2.33 MH/m, b_f = 12,37 кH·c/m, сложный режим колебаний с кратностью 2) Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Oscillograms of the movements of the roller of the vibrating roller and the soil, as well as the reaction forces of the soil for a characteristic loading cycle $(k_s = 180 \text{ MN/m}, b_s = 300 \text{ kN} \cdot \text{s/m}, m_d = 1000 \text{ kg}, m_r = 1000 \text{ kg}, m_s = 200 \text{ kg}, \omega = 188.4 \text{ row/s},$ $P = 98 \text{ kN}, k_r = 2.33 \text{ MN/m}, b_r = 12.37 \text{ kN} \cdot \text{s/m}, \text{ a complex oscillation mode with a multiplicity of 2})$ Source: compiled by the authors.

Для верификации реологической модели системы «рама – валец – грунт» были проведены расчеты по разработанной реологической модели взаимодействия с грунтом вибрационного катка DM-617, показавшие удовлетворительное согласование расчетных значений размаха вертикальных колебаний вальца и ускорения вертикальных колебаний вальца вибрационного катка DM-617с экспериментальными данными [31, 32].

По разработанной модели был проведен вычислительный эксперимент по определению численных значений времени нагружения t_{μ} (увеличения контактных напряжений от нуля до максимального значения), времени разгрузки t_{ρ} (уменьшения контактных напряжений от максимального значения до нуля), а также максимальной силы реакции грунта F_{c}^{max} .

С учетом исследований [1, 33] в качестве независимых параметров вибрационного катка были выбраны масса вибровальцового модуля (масса, приходящаяся на переднюю ось) $M_{\rm s} = (m_d + m_f)$ и относительная вынуждающая сила P/Q_s (где Q_s – часть веса катка, приходящаяся на вибровальцовый модуль).

В качестве независимых параметров грунта были выбраны коэффициенты упругого k_s и вязкого b_s сопротивления грунта.

File Tools View Simulation Help

@ - 🚳 🕑 🕪 🔳 🐎 - 🔍 - 🐼 - 🖨 🖉 -

Таблица 1

Значения независимых параметров вычислительного эксперимента по взаимодействию вальца вибрационного катка с поверхностью грунта Источник: составлено авторами.

Table 1

The values of the independent parameters of the computational experiment on the interaction of the roller of a vibrating roller with the ground surface Source: compiled by the authors.

Параметр	Мини- мальное значение	Макси- мальное значение	Шаг изме- нения	Коли- чество значений
Масса вибровальцового модуля <i>М</i> _в , кг	2000	17 000	5000	4
Относительная вынуждающая сила <i>Р/Q_е</i>	2	5	1	4
Коэффициент упругого сопротивления грунта k _s , МН/м	30	180	50	4
Коэффициент вязкого сопротивления грунта <i>b_s</i> , кНс/м	100	300	100	3

Таблица 2

Регрессионные зависимости для расчета значений t_µ, t_р и F_s^{max} при взаимодействии вальца вибрационного катка с грунтом Источник: составлено авторами.

Table 2

Regression dependencies for calculating the values of t_n , t_p and F_s^{max} in the interaction of the roller of a vibrating roller with the ground Source: compiled by the authors.

Вид зависимости	Значение <i>R</i>	
$I_{\mu} = -34,09 + 19,93 \cdot M_{\rm B}^{-7,79} \cdot (P/Q_{\rm B})^{20,18} \cdot k_{\rm s}^{-15,79} \cdot b_{\rm s}^{2,18} + 50,8 \cdot k_{\rm s}^{-0,063} \cdot M_{\rm B}^{0,104} \cdot (P/Q_{\rm B})^{-0,032}$	0,935	
$t_{p} = -505,36 + 526,87 \cdot M_{B}^{0,00783} \cdot (P/Q_{B})^{-0,0041} \cdot K_{s}^{-0,000596} \cdot b_{s}^{-0,0006}$	0,918	
$F_{s}^{max} = -132\ 055 + 0.0011 \cdot M_{B}^{0,178} \cdot (P/Q_{B})^{1,45} \cdot k_{s}^{2,201} \cdot b_{s}^{-0,208} + +132\ 035,3 \cdot M_{B}^{0,000542} \cdot (P/Q_{B})^{0,00024}$	0,898	

В таблице 1 представлены значения независимых параметров (факторов) вычислительного эксперимента. Общее количество сочетаний факторов равнялось 192.

В ходе проведения вычислительного эксперимента для каждого сочетания значений независимых параметров рассчитывались значения вынуждающего усилия Р, значения коэффициентов k, и b, амортизаторов рамы, значения масс m_d , m_f и m_s ($m_d = m_f = M_{\mu}/2$). Значение присоединенной массы грунта определялось из условия m = 0,2m . Затем в MATLAB Simulink производился расчет, в результате которого формировались осциллограммы перемещения основания виброплиты и грунта, а также осциллограмма изменения силы реакции грунта F. По осциллограмме силы реакции грунта Г определялись значения времени нагружения грунта t, и времени разгрузки грунта t_л. Продолжительность расчета составляла 10 с. Частота колебаний принималась постоянной и равной 30 Гц [1, 33], что соответствует угловой скорости 188,4 рад/с. Для исключения влияния переходных процессов анализ осциллограмм проводился в интервале времени от 9,5 до 10 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ

После определения по осциллограммам численных значений времени нагружения грунта t_{μ} , времени разгрузки грунта t_{ρ} , а также максимального значения силы реакции грунта F_s^{max} производилась статистическая обработка полученных результатов в программе STATISTICA для получения регрессионных зависимостей t_{μ} , t_{ρ} и F_s^{max} (таблица 2). В таблице 2 применяются следующие единицы измерения параметров: t_{μ} , мс; t_{ρ} , мс; и F_s^{max} , кН; M_e , т; k_s , МН/м; b_s , кНс/м.

На (рисунках 7, 8, 9) представлены некоторые графики влияния параметров M_g и k_s на значения t_µ, t_p и F_s^{max}, полученные на основании обработки осциллограмм программы MATLAB Simulink в сравнении с графиками, полученными на основании регрессионных зависимостей (см. таблицу 2).



Рисунок 7 – Влияние относительной вынуждающей силы P/Q_e и коэффициента упругого сопротивления грунта k_s на значение времени нагружения грунта t_н при M_e = 2000 кг и b_s = 100 кН·с/м Источник: составлено авторами.

Figure 7 – The effect of the relative forcing force P/Q_v and the coefficient of elastic resistance of the soil k_s on the value of the soil loading time t_n at $M_v = 2000$ kg and $b_s = 100$ kN·s/m Source: compiled by the authors.



Рисунок 8 – Влияние относительной вынуждающей силы Р/Q_s и коэффициента упругого сопротивления грунта k на значение времени разгрузки грунта t_p при M_s = 7000 кг и b_s = 100 кН·с/м Источник: составлено авторами.

Figure 8 – The effect of the relative forcing force P/Q_v and the coefficient of elastic resistance of the soil k_s on the value of the soil unloading time t_p at M_v = 7000 kg and b_s = 100 kN·s/m Source: compiled by the authors.



Рисунок 9 – Влияние относительной вынуждающей силы Р/Q₂ и коэффициента упругого сопротивления грунта k₅ на значение силы реакции грунта F₅^{max} при M₂ = 12 000 кг и b₅ = 100 кН·с/м Источник: составлено авторами.

Figure 9 – The effect of the relative forcing force P/Q_v and the coefficient of elastic resistance of the soil k_s on the value of the soil reaction force F_s^{max} at $M_v = 12\,000$ kg and $b_s = 100$ kN·s/m Source: compiled by the authors.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов вычислительного эксперимента показывает, что при увеличении плотности грунта (оцениваемой значением коэффициента упругого сопротивления грунта k) и относительной вынуждающей силы P/Q время нагружения грунта t. и время разгрузки грунта t_а уменьшаются, а значение максимальной силы реакции грунта F smax увеличивается, что соответствует существующим представлениям о характере изменения контактных напряжений при ударных нагрузках, описанных в работах Н.Я. Хархуты^{14,15} и др. Влияние массы вибровальцового модуля М, имеет более сложный характер. При увеличении значения М. время нагружения грунта t_" и время разгрузки грунта t₋ также увеличиваются. Значение максимальной силы реакции грунта F тах при увеличении значения М сначала увеличивается, а потом начинает уменьшаться. Возможно, это объясняется возрастаем инерционных сопротивлений движения вальца катка при увеличении его массы, что приводит к уменьшению динамики воздействия вальца под влиянием вынуждающей силы с учетом инерционных и вязко-упругих ограничителей движения со стороны рамы и грунта.

Соотношение между временем нагружения грунта t, и временем разгрузки t, грунта при моделировании взаимодействия вибрационного катка изменяется в диапазоне $t_{c}/t_{p} = 0.5...2$ (по результатам обработки осциллограмм) и t_{μ}/t_{p} = 0,82...1,04 (по значениям, рассчитанным по уравнениям регрессии). В среднем рассчитанное по результатам обработки осциллограмм соотношение t_{μ}/t_{p} составляет $t/t_{\rm a}$ = 0,97, а по уравнениям регрессии (см.) соотношение t_{μ}/t_{p} составляет t_{μ}/t_{p} = 0,96. Таким образом, реологическая модель воспроизводит асимметричный характер изменения контактных напряжений при уплотнении грунта вибрационным катком, наблюдающимся в экспериментальных осциллограммах напряжений, полученных при полевых экспериментальных исследованиях [34].

¹⁴ Хархута Н.Я. Машины для уплотнения грунтов. Л.: Машиностроение, 1973. 176 с.

¹⁵ Хархута Н.Я., Васильев Ю.М. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1975. 288 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные в результате обработки результатов вычислительного эксперимента численные значения времени нагружения и разгрузки грунта при воздействии вальца вибрационного катка имеют большое значение для расчета глубины распространения напряжений в грунте¹⁶ и распределения напряжений в грунте после прохода вибрационного катка с использованием волнового подхода к описанию распространения напряжений в грунте [1].

Дальнейшее повышение точности воспроизведения математической моделью характерных особенностей колебаний элементов системы «рама – валец – грунт» возможно за счет уточнения зависимостей для расчета численных значений коэффициентов упругого и вязкого сопротивления амортизаторов вибрационного вальца в зависимости от массы катка, соотношения масс вальца и рамы, вынуждающей силы и частоты колебаний вальца.

Поскольку частота колебаний оказывает большое значение на численные значения времени нагружения и разгрузки грунта, целесообразно проведение вычислительного эксперимента по моделированию взаимодействию вальца вибрационного катка с поверхностью грунта для расширенного перечня независимых параметров, включающего частоту колебаний.

список источников

1. Тюремнов И.С., Игнатьев А.А. Уплотнение грунтов вибрационными катками: монография. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2012. 140 с.

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

3. Русаков И.Г., Харкевич А.А. Вынужденные колебания системы, ударяющейся об ограничитель // Журнал технической физики. 1942. Вып. XII, № 11–12. С. 715–721.

4. Попов Г.Н. Выбор параметров прицепных вибрационных катков для уплотнения грунтовых оснований // Тр. ЛПИ. 1972. Вып. 321. С. 114–119.

5. Liu L. et al. Nonlinear Dynamics of the Rigid Drum for Vibratory Roller on Elastic Subgrades // Shock Vib. 2021. Vol. 2021. P. 1–9. doi:10.1155/2021/9589230 6. Тарасов В.Н., Бояркина И.В., Серебренников В.С. Влияние массы вертикального пригруза на амплитуду колебаний вибровальца и виброзащиту рамы дорожного катка // Строительные и дорожные машины. 2019. № 9. С. 30–36.

7. Siminiati D., Hren D. Simulation on vibratory roller-soil interaction // Adv. Eng. 2008. Vol. 2, № 1. P. 111–120.

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

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. https://www. elibrary.ru/download/elibrary_19032661_60709817.pdf

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

11. Hashimoto T., Fujino K., Tateyama K. Suggestion of the ground stiffness estimative method with the running speed of a plate compactor // ISARC 2016 – 33rd Int. Symp. Autom. Robot. Constr. 2016. № Isarc. P. 421–427. DOI 10.22260/isarc2016/0051

12. Susante P., Mooney M. Capturing Nonlinear Vibratory Roller Compactor Behavior through Lumped Parameter Modeling // J. Eng. Mech. 1996. P. 684–693. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2008)134:8(684)

13. Li S., Hu C. Study on Dynamic Model of Vibratory Roller – Soil System // IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2018. Vol. 113, № 1. P. 1-5. (doi:10.1088/1755-1315/113/1/012187)

14. Cao Y.-W. et al. Research on the correlation between vibration acceleration of roller and compaction degree of subgrade soil // ICCTP 2010: Integrated Transportation Systems: Green, Intelligent, Reliable – Proceedings of the 10th International Conference of Chinese Transportation Professionals. 2010. Vol. 382. P. 2974–2982. DOI: 10.1061/41127(382)316

15. Шишкин Е.А., Смоляков А.А. Обоснование способа регулирования контактного усилия вибрационного вальца с уплотняемым материалом // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 1(53). С. 36–42. DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-02-184-189

16. Bratu P., Tonciu O., Niţu M.C. Modeling the Vibratory Compaction Process for Roads // Buildings. 2023. Vol. 13, № 11. P. 1–12. https://doi.org/10.3390/ buildings13112837

17. Shi M. et al. Effective compaction power index for real-time compaction quality assessment of coarsegrained geomaterials: Proposal and comparative study // Constr. Build. Mater. 2022. Vol. 321. P. 126375. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126375

¹⁶ Тюремнов И.С. Обоснование подходов для разработки методики прогнозирования технологических возможностей мобильных грунтоуплотняющих машин виброударного действия // Интерстроймех-2021 [Электронный ресурс]: сборник докладов XXV Международной научно-технической конференции (Москва, 5–7 октября 2021 г.) / редакционная коллегия: Б.Г. Ким, Е.М. Кудрявцев Р.Р.Ш. М.: Издательство МИСИ – МГСУ, 2021. С. 94–102. https://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/46043/

18. Pietzsch D., Poppy W. Simulation of soil compaction with vibratory rollers // J. Terramechanics. 1992. Vol. 29, № 6. P. 585–597. doi:10.1016/0022-4898(92)90038-L

19. Shen P. Dynamic characteristics of the intelligent compactor model with adjustable vibration modes // Proc. 2nd Int. Conf. Transp. Eng. ICTE 2009. 2009. P. 2322–2327. doi:10.1061/41039(345)384

20. Михеев В.В., Савельев С.В. Математическая модель уплотнения упруговязкопластичной грунтовой среды при взаимодействии с рабочим органом дорожной машины в рамках модифицированного подхода сосредоточенных параметров // Вестник СибАДИ. 2017; (2(54)): 28–36. https://doi. org/10.26518/2071-7296-2017-2(54)-28-36

21. Nguyen V. et al. Vibration Analysis and Modeling of an Off-Road Vibratory Roller Equipped with Three Different Cab's Isolation Mounts // Shock Vib. 2018. Vol. 2018. P. 1–17 (doi:10.1155/2018/8527574)

22. Pistrol J. et al. Consideration of the Variable Contact Geometry in Vibratory Roller Compaction // Infrastructures. 2023. Vol. 8, № 7. P. 1–15. https://doi.org/10.3390/ infrastructures8070110

23. Lu Y. et al. Research on vibratory & oscillatory coexistence nonlinear dynamics based on drumsubgrade coupling model // Int. J. Non. Linear. Mech. 2023. Vol. 157. P. 104536. https://doi.org/10.1016/j. ijnonlinmec.2023.104536

24. Baidya D.K., Muralikrishna G., Pradhan P.K. Investigation of foundation vibrations resting on a layered soil system // J. Geotech. Geoenviron. Eng. 2006. № 132(1). P. 116–123.

25. Gazetas G. Analysis of machine foundations: State of the art // Int. J. Soil Dyn. Earthq. Eng. 1983. N 2(1). P. 2–42.

26. Lysmer J., Richart F.E. Dynamic response of footings to vertical loading // J. Soil Mech. Found. Div. 1966. \mathbb{N} 92(1). P. 65–91.

27. Dobrescu C. The dynamic response of the vibrating compactor roller, depending on the viscoelastic properties of the soil // Appl. Syst. Innov. 2020. Vol. 3, № 2. P. 1–10. DOI: 10.3390/asi3020025

28. Dobrescu C. Comparative Analysis of the Voigt–Kelvin and Maxwell Models in the Compaction by Vibration Process // Springer Proc. Phys. Springer International Publishing, 2021. № 251. P. 359–366. doi:10.1007/978-3-030-54136-1_36

29. Tyuremnov I.S., Morev A.S., Furmanov D.V. On the justification of the value of the apparent mass of soil in rheological modeling of the process of soil compaction by a vibrating roller // J. Phys. Conf. Ser. 2019. Vol. 1260, № 11. P. 1–11. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/11/112033

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

31. 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 СибАДИ. 2020;17(2):182–195. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-182-195

32. Tyuremnov I.S., Krayushkin A.S. Digital Signal Processing in Studying the Vertical Accelerations of the Vibratory Roller Frame // AIP Conf. Proc. 2022. Vol. 2486, № November. P. 1–8. DOI: 10.1063/5.0106479

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

34. Tyuremnov I.S., Furmanov D.V. Experimental studies of stresses in soil affected by a vibratory roller // J. Phys. Conf. Ser. 2020. Vol. 1546, № 1. DOI: 10.1088/1742-6596/1546/1/012144, https://iopscience. iop.org/article/10.1088/1742-6596/1546/1/012144/pdf

REFERENCES

1. Tyuremnov I.S., Ignat'ev A.A. Compaction of soils by vibrating rollers: a monograph [Electronic resource]. Yaroslavl: Izd-v YaSTU, 2012: 140. (in Russ.)

2. Tyuremnov I.S., Filatov I.S., Ignat'ev A.A. Review of Manufacture Recommendations on the Use of Vibrating Rollers at the Soil Compaction. *Bulletin of PNU*. 2014; 2(33): 155–162. (in Russ.)

3. Rusakov I.G., KHarkevich A.A. Vynuzhdennye kolebaniya sistemy, udaryayushcheysya ob ogranichitel' // Journal of Technical Physics. 1942; Vol. XII, № 11–12: 715–721. (in Russ.)

4. Popov G.N. Parameter selection of trailed vibrating rollers for compacting soil bases. *Tr. LPI.* 1972; vyp. 321: 114–119. (in Russ.)

5. Liu L. et al. Nonlinear Dynamics of the Rigid Drum for Vibratory Roller on Elastic Subgrades. *Shock Vib.* 2021; Vol. 2021: 1–9.

6. Tarasov V.N.; Boyarkina I.V.; Serebrennikov V.S. Influence of the vertical loader mass on the vibration amplitude of the vibrating roller and vibration protection of the road roller frame. Construction and Road Building Machinery. 2019; 9: 30–36. (in Russ.)

7. Siminiati D., Hren D. Simulation on vibratory roller-soil interaction. *Adv. Eng.* 2008; Vol. 2, № 1: 111–120.

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

9. Shabanova G.I., Savelyev S.V., Bury G.G. Mathematical description of the vibrating system "vibrating working body – soil. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2013; 3(31): 102–107. (in Russ.)

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

11. Hashimoto T., Fujino K., Tateyama K. Suggestion of the ground stiffness estimative method with the running speed of a plate compactor. *ISARC*

PART I

2016 – 33rd Int. Symp. Autom. Robot. Constr. 2016; № Isarc: 421–427.

12. Susante P., Mooney M. Capturing Nonlinear Vibratory Roller Compactor Behavior through Lumped Parameter Modeling. J. Eng. Mech. 1996: 684–693.

13. Li S., Hu C. Study on Dynamic Model of Vibratory Roller – Soil System. *IOP Conf. Ser. Earth Environ*. Sci. 2018; Vol. 113, № 1.

14. Cao Y.-W. et al. Research on the correlation between vibration acceleration of roller and compaction degree of subgrade soil. *ICCTP 2010: Integrated Transportation Systems: Green, Intelligent, Reliable – Proceedings of the 10th International Conference of Chinese Transportation Professionals.* 2010; Vol. 382:. 2974–2982.

15. Shishkin E.A., Smolyakov A.A. Justification of the method of regulating the contact force of vibrating roller with compacted material. *Systems. Methods. Technologies.* 2022;1(53): 36–42.

16. Bratu P., Tonciu O., Niţu M.C. Modeling the Vibratory Compaction Process for Roads. *Buildings*. 2023; Vol. 13, № 11.

17. Shi M. et al. Effective compaction power index for real-time compaction quality assessment of coarsegrained geomaterials: Proposal and comparative study. *Constr. Build. Mater.* 2022; Vol. 321: 126375.

18. Pietzsch D., Poppy W. Simulation of soil compaction with vibratory rollers. *J. Terramechanics.* 1992; Vol. 29, № 6: 585–597.

19. Shen P. Dynamic characteristics of the intelligent compactor model with adjustable vibration modes. *Proc. 2nd Int. Conf. Transp. Eng.* ICTE 2009. 2009: 2322–2327.

20. Mikheyev V.V., Saveliev S.V. Modeling of properties of deformable soil media during compaction by cylindrical roller drums matematical modeling of compaction for elastoviscoplastic soil media caused by the interaction with work tool of compacting machine in the framework of modified. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017; (2(54)): 28–36. (In Russ.) https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-2(54)-28-36

21. Nguyen V. et al. Vibration Analysis and Modeling of an Off-Road Vibratory Roller Equipped with Three Different Cab's Isolation Mounts. *Shock Vib.* 2018. Vol. 2018.

22. Pistrol J. et al. Consideration of the Variable Contact Geometry in Vibratory Roller Compaction. *In-frastructures.* 2023; Vol. 8, № 7.

23. Lu Y. et al. Research on vibratory & oscillatory coexistence nonlinear dynamics based on drum-sub-grade coupling model. *Int. J. Non. Linear*. Mech. 2023; Vol. 157: 104536.

24. Baidya D.K., Muralikrishna G., Pradhan P.K. Investigation of foundation vibrations resting on a layered soil system. J. Geotech. Geoenviron. *Eng.* 2006; № 132(1): 116–123.

25. Gazetas G. Analysis of machine foundations: State of the art. Int. J. Soil Dyn. Earthq. *Eng.* 1983; 2(1): 2–42.

26. Lysmer J., Richart F.E. Dynamic response of footings to vertical loading. *J. Soil Mech. Found. Div.* 1966; 92(1): 65–91.

27. Dobrescu C. The dynamic response of the vibrating compactor roller, depending on the viscoelastic properties of the soil. *Appl. Syst. Innov.* 2020; Vol. 3, \mathbb{N} 2: 1–10.

28. Dobrescu C. Comparative Analysis of the Voigt–Kelvin and Maxwell Models in the Compaction by Vibration Process. *Springer Proc. Phys. Springer International Publishing*. 2021; 251: 359–366.

29. Tyuremnov I.S., Morev A.S., Furmanov D.V. On the justification of the value of the apparent mass of soil in rheological modeling of the process of soil compaction by a vibrating roller. *J. Phys. Conf. Ser.* 2019; 1260, № 11.

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

31. Tyuremnov 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 In-dustry Journal*. 2020; 17(2): 182–195. (In Russ.) https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-182-195

32. Tyuremnov I.S., Krayushkin A.S. Digital Signal Processing in Studying the Vertical Accelerations of the Vibratory Roller Frame. *AIP Conf. Proc.* 2022. Vol. 2486, № November. P. 1–8.

33. Tyuremnov I.S., Ignatyev A.A., Filatov I.S. Statistical analysis of technical characteristics of soil vibratory rollers. *Bulletin of PNU.* 2014; 3(34): 81–88. (In Russ.)

34. Tyuremnov I.S., Furmanov D.V. Experimental studies of stresses in soil affected by a vibratory roller. *J. Phys. Conf. Ser.* 2020; Vol. 1546, № 1.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Тюремнов И.С. Общая организация работы авторского коллектива, формулирование цели и задач исследования, разработка методики проведения исследования, разработка математической модели, проведение и обработка результатов вычислительного эксперимента, написание текста статьи.

Шорохов Д.А. Проведение и обработка результатов вычислительного эксперимента, написание текста статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Ivan S. Tyuremnov The general organization of the work of the team of authors, the statement of the purpose and objectives of the study, the statement of the purpose and objectives of exploration, the organization and conduct of experimental research, writing the text of the article.

Dmitrii A. Shorohov Conducting and processing the results of a computational experiment, writing the text of the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тюремнов Иван Сергеевич – канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Строительные и дорожные машины» Ярославского государственного технического университета (150023, г. Ярославль, Московский пр., 88), **ORCID:** https://orcid. org/0000-0003-2261-4153, **SPIN-код:** 9976-0728, e-mail: tyuremnovis@yandex.ru

Шорохов Дмитрий Александрович – аспирант кафедры «Строительные и дорожные машины» Ярославского государственного технического университета (150023, г. Ярославль, Московский пр., 88), **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-1825-0676, **SPIN-код:** 6483-6955 e-mail: dogpop150@ gmail.com

INFORMATION ABOUT AUTHORS

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

Dmitrii A. Shorohov. Graduate Student of the Construction and Road Machines Department, Yaroslavl State Technical University, (88, Moskovsky Prospekt, Yaroslavl, 150023), ORCID: https://orcid. org/0000-0003-1825-0676, SPIN-код: 6483-6955 e-mail: dogpop150@gmail.com