

Научная статья

УДК 625.08:624.131

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-402-414>

EDN: JYOVGF



МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА ДОРОЖНОГО КАТКА С УПЛОТНЯЕМОЙ ГРУНТОВОЙ СРЕДОЙ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

С.В. Савельев¹, В.В. Михеев², И.К. Потеряев¹ ✉, А.С. Савельев¹

¹Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск, Россия

²Омский государственный технический университет (ОмГТУ),
г. Омск, Россия

✉ ответственный автор
ilya_poter@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Статья посвящена изучению особенностей моделирования процесса взаимодействия вибровальца с деформируемым грунтом при уплотнении технологических слоев автодороги.

Методы и материалы. Производится математическое моделирование колебательной системы «вибровалец катка – деформируемая среда», заключающееся в построении системы дифференциальных уравнений, описывающих взаимодействующие элементы системы. Система включает в себя массивные тела, обладающие различными совокупностями упругих, вязких и фрикционных свойств. Эти свойства соответствуют реологическим характеристикам рабочего органа катка и деформируемой им грунтовой среды.

Результаты. Представлены системы дифференциальных уравнений движения колеблющихся масс, позволяющие выявить особенности процесса уплотнения грунтов вибровальцами. На основе анализа уравнений систем выявлены параметры энергоэффективных режимов уплотнения и проведена их оценка с учетом известной зависимости коэффициента вязкого трения деформируемого грунта от влияния внешней деформирующей силы.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты могут быть использованы для обоснования комплекса эксплуатационных параметров рациональных режимов работы виброкатка на различных этапах уплотнения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: каток, уплотнение, грунт, коэффициент уплотнения, автомобильная дорога, деформация, энергоэффективность, уплотнение

Статья поступила в редакцию 07.10.2025; одобрена после рецензирования 24.03.2026; принята к публикации 15.06.2026.

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: Савельев С.В., Михеев В.В., Потеряев И.К., Савельев А.С. Математические модели взаимодействия рабочего органа дорожного катка с уплотняемой грунтовой средой с точки зрения энергоэффективности // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 3. С. 402-414. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-402-414>

© Савельев С.В., Михеев В.В., Потеряев И.К., Савельев А.С., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-402-414>

EDN: JYOVGF

MATHEMATICAL MODELS OF INTERACTION BETWEEN OPERATING EQUIPMENT OF ROAD ROLLER AND COMPACTED SOIL IN TERMS OF ENERGY EFFICIENCY

Sergey V. Savelyev¹, Vitaly V. Mikheyev², Ilya K. Poteyaev¹ ✉, Andrey S. Savelyev¹

¹Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),
Omsk, Russia,

²Omsk State Technical University,
Omsk, Russia,

✉ corresponding author
ilya_poter@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. This article is devoted to modeling interaction between a vibratory drum and soil under deformation during compaction of roadbed layers.

Methods and Materials. Mathematical modeling of the roller vibratory drum-deformable medium oscillatory system is presented. This modeling involves building a system of differential equations which describes interacting elements of the oscillatory system. The system includes massive bodies with rigid and viscous properties; the latter comply with the rheological characteristics of the roller drum and the soil compacted.

Results. Systems of differential equations for vibrating mass motion are presented, enabling to determine the average vibration acceleration values within the volume of compacted soil. The obtained dependences of the viscous friction coefficient of the deformable soil on the influence of an external deforming force are presented.

Discussion and Conclusion. The results obtained can be used to substantiate rational operating parameters of vibratory roller modes at various compaction stages.

KEYWORDS: roller, compaction, soil, compaction coefficient, highway, deformation, energy efficiency, compaction

The article was submitted: October 07, 2025; **approved after reviewing:** March 24, 2026; **accepted for publication:** June 15, 2026.

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: Savelyev S.V., Mikheyev V.V., Poteyaev I.K., Savelyev A.S. Mathematical models of interaction between operating equipment of road roller and compacted soil in terms of energy efficiency. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (3): 402-414. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-402-414>

© Savelyev Sergey V., Mikheyev Vitaly V., Poteyaev Ilya K., Savelyev Andrey S., 2026



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

ВВЕДЕНИЕ

Уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог – это ответственная и сложная технологическая операция. Качество выполнения работ при данной операции напрямую влияет на работоспособность и долговечность автодороги [1, 2]. Уплотнение грунтов земляного полотна осуществляется дорожными катками, вследствие большого разнообразия типов грунтов применяются различные типы катков. Еще одним фактором, усложняющим операцию уплотнения, является то, что в процессе уплотнения обычно используют сразу несколько типоразмеров уплотняющей техники [2, 3]. Обоюдность и взаимосвязанность данных факторов усложняют определение эффективных режимных и конструктивных параметров дорожных машин¹. Особенно ярко это проявляется при обосновании параметров новых конструкций дорожных катков, для которых ещё нет достаточной статистики по производству работ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для выявления рациональных конструктивных и технологических рекомендаций по использованию дорожных катков необходимо проводить не только экспериментальные, но и теоретические исследования. При помощи методов математического моделирования возможно выявить эффективные режимы работы уплотнителя в зависимости от физико-механических характеристик деформируемых дорожных материалов [4, 5]².

Кинетика деформирования грунтовой среды дорожными катками может быть формализована в виде представления физи-

ко-механических свойств грунтов реологическими моделями, отражающими их наиболее существенные характеристики при уплотнении. Формально уплотняемый грунт можно описать в виде упруговязкопластичной среды [6, 7]:

$$\sigma_{el} + \sigma_{pl} + \sigma_v = (F_o \sin \omega t + F_{cm}) / S, \quad (1)$$

где σ_{el} – напряжения, обусловленные упругими деформациями, Па (реологическая модель Гука); σ_{pl} – напряжения, обусловленные пластическими деформациями, Па (реологическая модель Сен-Венана); σ_v – напряжения, обусловленные вязким сопротивлением деформированию, Па (реологическая модель Ньютона); ω – частота колебаний, с⁻¹; F_o – амплитуда вынуждающей силы, Н; $F_{cm} = Mg$ – сила тяжести РО, Н; S – площадь пятна контакта, м².

Представленные реологические модели имеют широкое применение [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17], причём в зависимости от условий и режимов взаимодействия в системе «уплотняемый грунт – рабочий орган уплотнителя» её конкретные элементы будут формироваться в виде различных наборов вышеуказанных реологических тел [18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30].

Рассмотрим модель взаимодействия рабочих органов катков с деформируемыми грунтовыми средами (рисунок 1). Модель описывает деформирование слоя грунта, подвергаемого воздействию от рабочего органа катка. При превышении на поверхности грунтового слоя напряжения, соответствующего пределу текучести, упругие деформации отсутствуют (грунт реализован массивным телом Сен-Венана с вязкостью).

¹ Определение параметров и режимов уплотнения дорожных катков: учебное пособие / Г.В. Кустарев, В.И. Баловнев, Р.Г. Данилов, С.А. Павлов. М.: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2022. 142 с.

² СП 34.13330.2021 Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85. [Электронный ресурс]. URL: <http://rosdomii.novateh.ru/docs/> (дата обращения: 03.10.2025).

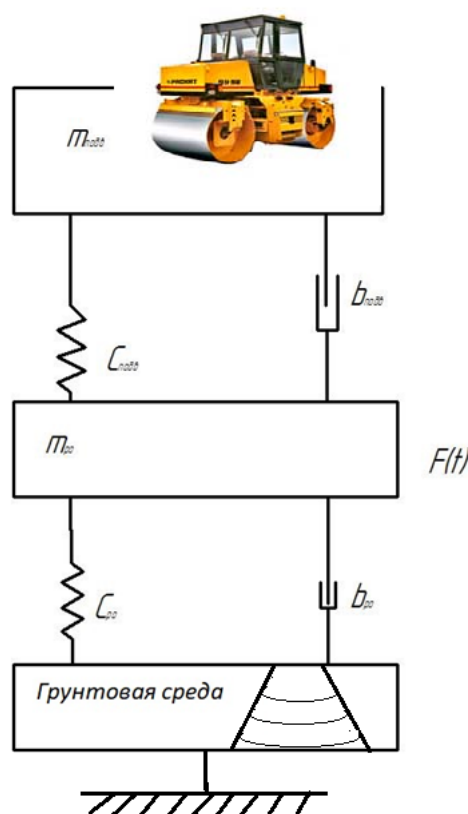


Рисунок 1 – Модель взаимодействия РО уплотнителя с грунтовой средой (в общем случае деформируемого)
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Model of interaction of the drum and the soil (deformable, in the general)
Source: compiled by the authors.

$$\begin{cases} m_{PO}\ddot{z}_{PO} = -c_{PO}(z_{PO})(z_{PO} - z_1) - b_{PO}(z_{PO})\dot{z}_{PO} + F_{ext}(t) \\ m_1(t)\ddot{z}_1 = c_{PO}(z_{PO})(z_{PO} - z_1)(1 - \theta(\sigma - \sigma_{pl})) - b_1(z_1)(\dot{z}_1) - \frac{\dot{z}_1}{|\dot{z}_1|}\theta(\sigma - \sigma_{pl})S_{cont}(t)\sigma_{pl} \end{cases} \quad (2)$$

Здесь введены следующие обозначения, сохраняющиеся в дальнейшем:

m_{PO} – масса рабочего органа; c_{PO} – жёсткость рабочего органа; b_{PO} – вязкость рабочего органа; $F_{ext}(t)$ – величина внешней силы, воздействующей на грунт; z_{PO} – координата центра масс рабочего органа; m_1 – масса уплотняемой области грунта, непосредственно взаимодействующей с РО; b_1 – вязкость уплотняемой области грунта; z_1 – координата центра масс уплотняемой области грунта; σ – контактное давление; σ_{pl} – предел текучести грунта; $S_{cont}(t)$ – площадь пятна контакта рабочего органа с грунтом. Величины, характеризующие силы сопротивления грунта деформированию, считаются зависящими от величины деформации, описывая самый общий случай взаимодействия грунта с РО.

Рассмотрим следующий случай (система (3)): область грунтового слоя деформируется как единый упруговязкопластичный элемент. Накопленная неупругая деформация полностью сохраняется (грунт представлен массивным линейно деформируемым вязким телом) [8, 9, 10]. В таком состоянии грунтовая среда накапливает пластические деформации, однако не так интенсивно, как в случае, описываемом системой (2). При этом реализация параметров катка режимов обработки среды, приводящие среду в указанный тип напряжённо-деформируемого состояния (НДС), являются вполне достижимыми.

$$\begin{cases} m_{PO}\ddot{z}_{PO} = -c_{PO}(z_{PO})(z_{PO} - z_1) - b_{PO}(z_{PO})\dot{z}_{PO} + F_{ext}(t) \\ m_1(t)\ddot{z}_1 + \frac{dm_1(t)}{dt}\dot{z}_1 = c_{PO}(z_{PO})(z_{PO} - z_1) - \text{sign}(\sigma)c_1z_1 - b_1(z_1)(\dot{z}_1) \end{cases}, \quad (3)$$

c_1 – жесткость уплотняемой области грунта по отношению к деформации сжатия.

Далее рассмотрим систему, когда материал слоя деформируется рабочим органом как единый упруговязкий элемент (грунт реализован телом Кельвина – Фойгта). Данная система не соответствует энергоэффективному уплотнению, обеспечивая диссипацию энергии уплотнителя на преодоление вязких сил сопротивления. При попытках подбора частотного параметра энергоэффективного режима возможно возникновение нежелательных резонансных явлений или переход к вибротрамбованию.

$$\begin{cases} m_{PO}\ddot{z}_{PO} = -c_{PO}(z_{PO})(z_{PO} - z_1) - b_{PO}(z_{PO})\dot{z}_{PO} + F_{ext}(t) \\ m_1(t)\ddot{z}_1 + \frac{dm_1(t)}{dt}\dot{z}_1 = -c_1(z_1)z_1 - b_1(z_1)\dot{z}_1 \end{cases}, \quad (4)$$

c_1 – жесткость уплотняемой области грунта.

Подобные модели весьма часто встречаются при интегрировании уравнений динамики уплотняемого материала для активной области слоя [8, 9, 10]. Ее реализация в технологическом процессе является нежелательной, поскольку интенсивной обработке грунтового слоя с накоплением пластических деформаций подвергается только околоповерхностный участок деформируемого слоя, а нижняя часть слоя деформируется квазиупруго (неравномерно в зависимости от нагружения или разгрузки). Параметры работы катка, обеспечивающие такое НДС грунта, не являются энергоэффективными. Чаще всего это происходит при неправильном выборе толщины уплотняемого слоя. Теоретическое рассмотрение энергоэффективности уплотнения в рамках модели Кельвина – Фойгта принципиально невозможно, поскольку неупругие деформации в ней отсутствуют и для их рассмотрения привлекаются дополнительные методы. Несмотря на это, движение массы грунтовой среды, взаимодействующей с РО катка, описывается удовлетворительно.

$$\begin{cases} m_{PO}\ddot{z}_{PO} = -c_{PO}(z_{PO})(z_{PO} - z_1) - b_{PO}(z_{PO})\dot{z}_{PO} + F_{ext}(t) \\ m_1(t)\ddot{z}_1 = c_{PO}(z_{PO})(z_{PO} - z_1)(1 - \theta(\sigma - \sigma_{fl})) - b_1(z_1 - z_2)(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) - \frac{\dot{z}_1 - \dot{z}_2}{|\dot{z}_1 - \dot{z}_2|} \theta(\sigma - \sigma_{fl})S_{cont}(t)\sigma_{pl} \\ m_2(t)\ddot{z}_2 = \frac{\dot{z}_1 - \dot{z}_2}{|\dot{z}_1 - \dot{z}_2|} \theta(\sigma - \sigma_{pl})S_{cont}(t)\sigma_{pl} - c_{2qel}(z_2)(z_2) - b_2(z_2)(\dot{z}_2) \end{cases}, \quad (5)$$

где z_2 – координата центра масс области грунта, деформируемой как упруго-вязкое тело; m_2 – масса области грунта, деформируемой как упруго-вязкое тело; c_{2qel} – жесткость области грунта, деформируемой как упруго-вязкое тело; b_2 – вязкость области грунта, деформируемой как упруго-вязкое тело.

Рассмотрим более общую модель (система (6)), в которой приповерхностный участок слоя, взаимодействующий с рабочим органом катка, деформируется как массивное тело Сен-Венана. Следующий участок по глубине слоя полностью сохраняет линейные по напряжению пластические деформации. Режим работы катка, обеспечивающий динамику активной области слоя, отличается высокой энергоэффективностью. Практически вся энергия уплотняющего воздействия уходит на преодоление сил сцепления между частицами грунта в ходе неупругого деформирования.

$$\begin{cases} m_{PO}\ddot{z}_{PO} = -c_{PO}(z_{PO})(z_{PO} - z_1) - b_{PO}(z_{PO})\dot{z}_{PO} + F_{ext}(t) \\ m_1(t)\ddot{z}_1 = c_{PO}(z_{PO})(z_{PO} - z_1)(1 - \theta(\sigma - \sigma_{fl})) - \frac{\dot{z}_1 - \dot{z}_2}{|\dot{z}_1 - \dot{z}_2|} \theta(\sigma - \sigma_{fl}) S_{cont}(t) \sigma_{pl} , \\ m_2(t)\ddot{z}_2 = \frac{\dot{z}_1 - \dot{z}_2}{|\dot{z}_1 - \dot{z}_2|} \theta(\sigma - \sigma_{pl}) S_{cont}(t) \sigma_{pl} - c_{2d}(z_2)(z_2) \text{sign}(\sigma) - b_2(z_2)(\dot{z}_2) \end{cases} \quad (6)$$

c_{2d} – жесткость второй области грунта по отношению к деформации сжатия.

Трехмассовая модель (система (7)), в которой поверхность уплотняемого слоя напрямую взаимодействует с рабочим органом катка, деформируется в соответствии с моделью Сен-Венана. Следующий по глубине слоя массивный элемент – с частичным сохранением линейных по напряжению пластических деформаций. Режим уплотнения, когда уплотняемая среда переводится в состояние, аналогичное рассматриваемой модели, более энергозатратен, чем в предыдущем случае. Различие в полезной работе уплотнителя на данном режиме по отношению к предыдущему случаю определяется энергией, расходуемой на восстановление упругих деформаций второго массивного тела.

$$\begin{cases} m_{PO}\ddot{z}_{PO} = -c_{PO}(z_{PO})(z_{PO} - z_1) - b_{PO}(z_{PO})\dot{z}_{PO} + F_{ext}(t) \\ m_1(t)\ddot{z}_1 = c_{PO}(z_{PO})(z_{PO} - z_1)(1 - \theta(\sigma - \sigma_{fl})) - \frac{\dot{z}_1 - \dot{z}_2}{|\dot{z}_1 - \dot{z}_2|} \theta(\sigma - \sigma_{fl}) S_{cont}(t) \sigma_{pl} . \\ m_2(t)\ddot{z}_2 = \frac{\dot{z}_1 - \dot{z}_2}{|\dot{z}_1 - \dot{z}_2|} \theta(\sigma - \sigma_{pl}) S_{cont}(t) \sigma_{pl} - c_{2d}(z_2)(z_2) - b_2(z_2)(\dot{z}_2) \end{cases} \quad (7)$$

Далее представлена система уравнений динамики (8), взаимодействующего рабочего органа катка и активной области грунтового слоя, которая описывает нежелательную, но тем не менее часто реализуемую ситуацию образования грунтового ядра. Это приповерхностная область слоя деформируется как массивное упруго-вязкое тело Кельвина – Фойгта, образуя условное ядро. Область слоя, которая находится под ним, накапливает пластическую деформацию как вязкопластичное тело Сен-Венана. Уплотнение грунтового слоя, находящегося в состоянии, описываемом данной моделью, не может считаться энергоэффективным, поскольку значительная доля энергии рассеивается за счет вязкости ядра. Однако если конструктивные особенности катка не позволяют избежать такого состояния слоя, то для повышения эффективности процесса могут быть использованы резонансные свойства грунтового ядра:

$$\begin{cases} m_{PO}\ddot{z}_{PO} = -c_{PO}(z_{PO})(z_{PO} - z_1) - b_{PO}(z_{PO})\dot{z}_{PO} + F_{ext}(t) \\ m_1(t)\ddot{z}_1 + \frac{dm_2(t)}{dt} \dot{z}_1 = -c_{1gel}(z_1)(z_1 - z_2) - b_1(z_1 - z_2)(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) \\ m_2(t)\ddot{z}_1 = c_{PO}(z_{PO})(z_{PO} - z_2)(1 - \theta(\sigma - \sigma_{fl})) - b_2(z_2)(\dot{z}_2) - \frac{\dot{z}_2}{|\dot{z}_2|} \theta(\sigma - \sigma_{fl}) S_{cont}(t) \sigma_{pl} \end{cases} \quad (8)$$

Следующая модель, в виде уравнений динамики (9), также учитывает образование грунтового ядра в приповерхностном участке активной области слоя. Нижний участок отвечает линейному по напряжению деформированию с полным восстановлением упругих деформаций. В случае неизбежности образования ядра, как и в предыдущем случае, его негативное влияние на энергоэффективность процесса уплотнения может быть частично нейтрализовано корректировкой частоты колебаний рабочего органа уплотнителя. Необходимо учитывать резонансные характеристики колебательной системы.

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{PO} \ddot{z}_{PO} = -c_{PO}(z_{PO})(z_{PO} - z_1) - b_{PO}(z_{PO})\dot{z}_{PO} + F_{ext}(t) \\ \\ m_1(t) \ddot{z}_1 = -c_{1_{gel}}(z_1)(z_1 - z_2) - b_1(z_1 - z_2)(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) \\ m_2(t) \ddot{z}_2 = \frac{\dot{z}_1 - \dot{z}_2}{|\dot{z}_1 - \dot{z}_2|} \theta(\sigma - \sigma_{pl}) S_{cont}(t) \sigma_{pl} - c_{2d}(z_2)(z_2) \text{sign}(\sigma) - b_2(z_2)(\dot{z}_2) \end{array} \right. \quad (9)$$

Всё описание, приведенное для предыдущей системы, относится к случаю образования грунтового ядра (система (10)). Первый – это элемент Кельвина – Фойгта, второй элемент уже с частичным восстановлением

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{PO} \ddot{z}_{PO} = -c_{PO}(z_{PO})(z_{PO} - z_1) - b_{PO}(z_{PO})\dot{z}_{PO} + F_{ext}(t) \\ \\ m_1(t) \ddot{z}_1 = -c_{1_{gel}}(z_1)(z_1 - z_2) - b_1(z_1 - z_2)(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) \\ m_2(t) \ddot{z}_2 = \frac{\dot{z}_1 - \dot{z}_2}{|\dot{z}_1 - \dot{z}_2|} \theta(\sigma - \sigma_{pl}) S_{cont}(t) \sigma_{pl} - c_{2d}(z_2)(z_2) - b_2(z_2)(\dot{z}_2) \end{array} \right. \quad (10)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результатами использования методов математического моделирования процесса взаимодействия рабочих органов катков с деформируемыми средами будут рационально обоснованные габаритно-массовые и режимные параметры уплотняющей техники. Масса и геометрические характеристики, а также деформативные свойства вальца определяют, прежде всего, площадь пятна контакта с уплотняемой средой, создаваемые контактные давления и, как следствие, обрабатываемый объем грунта. Существующие модели гладковальцовых грунтовых катков как отечественные, так и зарубежные, обладают схожими массогабаритными параметрами. Радиус вальца варьируется от 0,4 до 0,8 м, ширина от 1,4 до 2,4 м, масса от 500 до 3000 кг.

При определении динамической вязкости грунтовой среды для представленных моделей могут быть использованы полиномиальные зависимости, аппроксимирующие экспериментальные данные, полученные проф. Д.Д. Барканом, С.В. Вяловым, Н.Я. Хархутой [27, 31, 32]. Полученные уравнения регрессии представлены на рисунке 2.

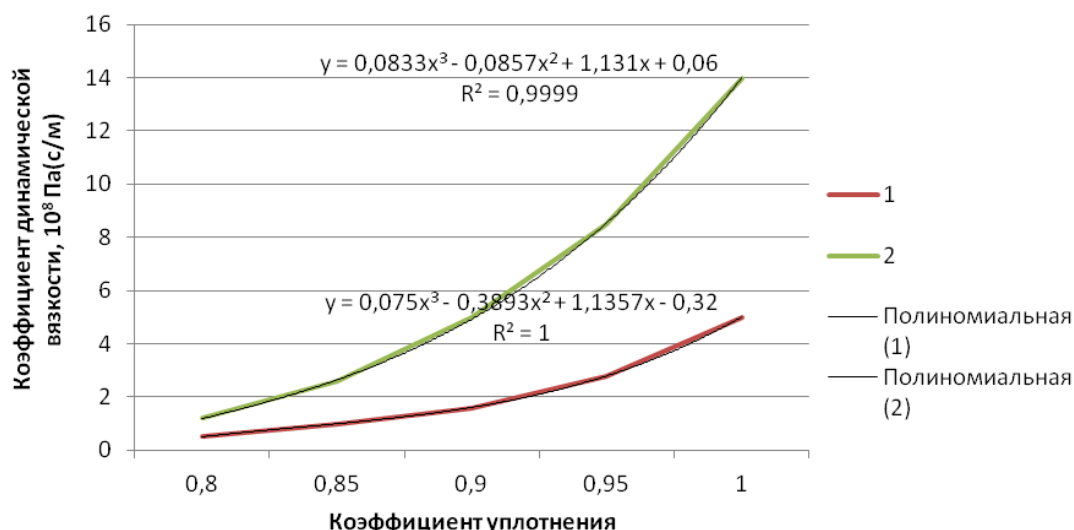


Рисунок 2 – Аппроксимационные зависимости динамической вязкости грунтов при работе катка:
1 – суглинок; 2 – супесь
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Approximation dependences of soil dynamic viscosity during roller operation:
1 – loam, 2 – sandy loam
Source: compiled by the authors.

В качестве критериев эффективности вибрационного уплотнения вальцом катка грунтовой среды, описываемой конкретной моделью (из представленных выше), предлагается выбрать соотношение полной энергии вынужденных колебаний среды и энергии, затраченной на неупругое деформирование. Для области грунта, реализованной телом Кельвина – Фойгта (с возможностью пластического деформирования), величиной, определяющей полную деформацию грунта при вибрационном нагружении, является его полное сопротивление деформированию (механический импеданс)

$$Z = m\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + k^2\omega^2},$$

где $\omega_0^2 = c/m$ – собственная частота системы при отсутствии вязкого трения, $k = b/m$; ω – циклическая частота приложения периодической силы.

Таким образом, остаточная неупругая деформация Δz_{res} может быть определена через модуль вынуждающей силы

$$\Delta z_{res} = \alpha \Delta z_{max} = \frac{\alpha F_0}{m\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + k^2\omega^2}},$$

где коэффициент α задается соотношением модуля упругой E_{el} и неупругой E_{pl} деформации следующим образом:

$$\alpha = \frac{E_{pl}}{E_{pl} + E_{el}}.$$

Тем самым доля работы, затраченной на пластическое деформирование, может быть определена как

$$W_{pl} = \frac{c_{pl}(\alpha \Delta z_{max})^2}{2}.$$

В свою очередь полная энергия, передаваемая колеблющейся массе грунта,

$$W_{tot} = \frac{m(\Delta z_{max}\omega)^2}{2}.$$

Доля энергии, затраченной на пластическое деформирование, есть

$$\eta = \frac{W_{pl}}{W_{tot}} = \frac{c_{pl}\alpha^2}{m\omega^2}.$$

В том случае, если область грунта находится в состоянии, когда неупругое деформирование реализуется посредством элемента сухого трения Сен-Венана, как, например, в системе (2), притом, что допускается также упругое деформирование до перехода контактного давления за предел пластичности.

Полная работа внешних сил, затраченная на деформацию грунта массы m , складывается из работы W_{el} упругого деформирования элемента Гука жесткости c_{el} при возрастании внешней силы до величины F_0 и работы W_{pl} неупругого деформирования при дальнейшем возрастании внешней силы до величины F_{np} , соответствующей пределу прочности грунта.

Оценим соотношение этих работ для выявления энергоэффективности. Работа по преодолению линейной по деформации упругой силы сопротивления есть

$$W_{el} = \frac{F_0^2}{2c_{el}}.$$

Дальнейшее увеличение внешней силы до F_{np} за время T приведет к совершению работы, равной

$$W_{pl} = \frac{F_0^2 T^2}{2m} \left(1 + \left(\frac{F_{np}}{F_0} - 1 \right) \frac{T}{2} \right)^2,$$

что дает долю энергии, затраченной на пластическое деформирование

$$\eta = \frac{W_{pl}}{W_{tot}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{F_{np}}{F_0} - 1 \right) \frac{T}{2} \right)^2}{\frac{m}{c_{el}T^2} + \left(1 + \left(\frac{F_{np}}{F_0} - 1 \right) \frac{T}{2} \right)^2}.$$

Для проведения численного анализа предлагается использовать численные зависимости динамических характеристик супеси и суглинка, графически представленные на рисунках 2, 3, 4, 5 и их аналитические выражения.

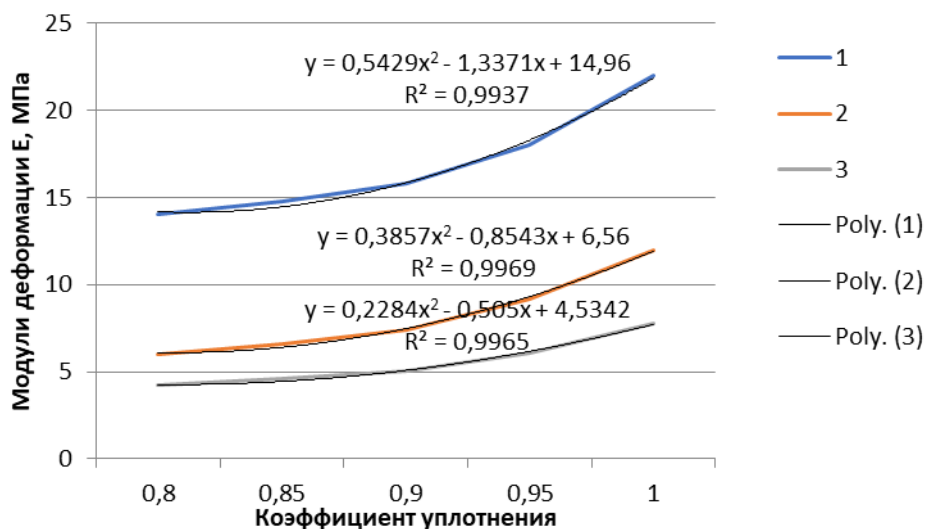


Рисунок 3 – Аппроксимационные зависимости модулей деформации супеси от стадии уплотнения при работе катка:
1 – модуль Юнга; 2 – модуль пластической деформации; 3 – модуль полной деформации
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Approximation relationships between deformation moduli for sandy loam and compaction stage during roller operation:
1- modulus of elasticity, 2 - plastic deformation modulus, 3 - total deformation modulus
Source: compiled by the authors.

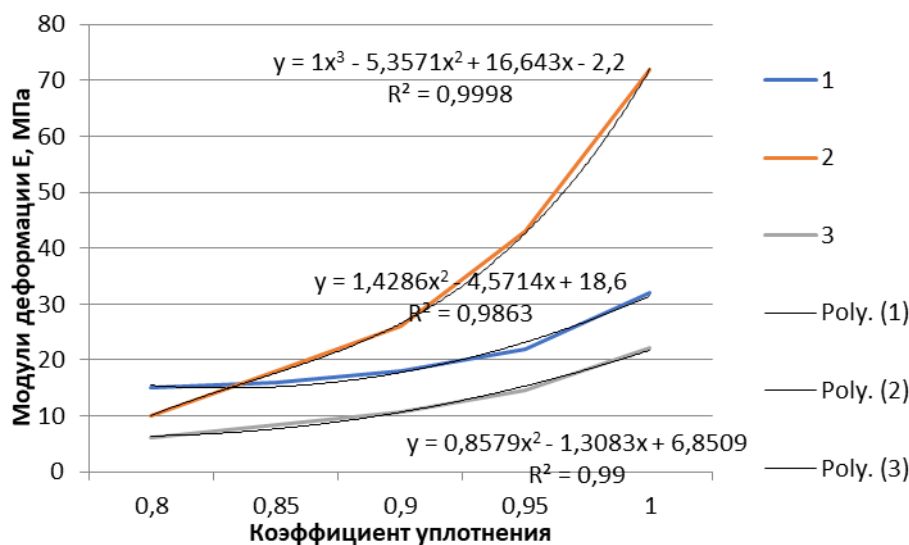


Рисунок 4 – Аппроксимационные зависимости модулей деформации суглинка от стадии уплотнения при работе катка:
1 – модуль Юнга; 2 – модуль пластической деформации; 3 – модуль полной деформации
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Approximation relationships between loam deformation moduli and compaction stage during roller operation:
1 – modulus of elasticity, 2 – plastic deformation modulus, 3 – total deformation modulus
Source: compiled by the authors.

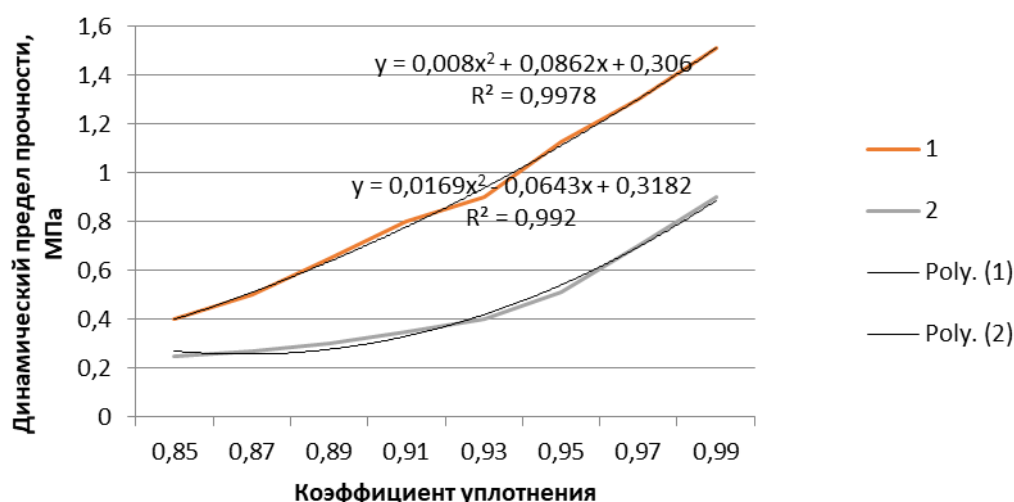


Рисунок 5 – Аппроксимационные зависимости динамического предела прочности грунтов при работе катка:
1 – суглинок; 2 – супесь
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Approximation relationships of dynamic soil tensile strength during roller operation:
1– loam, 2 – sandy loam
Source: compiled by the authors.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ процесса деформирования уплотняемых сред дорожными катками и разработанная математическая модель могут быть использованы при определении параметров режимов работы уплотняющей машины и массово-габаритных характеристик рабочих органов, соответствующих оптимальному с точки зрения энергоэффективности процессу уплотнения.

Исследования проводятся при поддержке гранта Российского научного фонда (РНФ) и Правительства Омской области № 23–29–10010 на тему «Разработка дорожных катков для повышения эффективности транспортно-го строительства с учетом региональных условий Омской области».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тюремнов И.С. Анализ технических характеристик различных типов ударно-вибрационных грунтоуплотняющих машин // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 6(94):706–716. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-706-716>. EDN IGOKXE.
2. Савельев С.В., Пермяков В.Б., Михеев В.В., Потеряев И.К. Инновационная уплотняющая техника и рекомендации по её использованию для ресурсосберегающих технологий дорожного строительства. Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2019. 193 с.

3. Шишкин Е.А., Иванченко С.Н., Сидорков В.В. [и др.]. Исследование взаимосвязи конструктивных и технологических параметров вибрационных и осцилляционных катков // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2021. № 2. С. 183–188.

4. Зайченко С.В. Исследование реологических характеристик грунтовых и бетонных смесей при их уплотнении // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2014. № 7:112–119.

5. Mikheyev V.V., Saveliev S.V., Permyakov V.B. Complex approach to the optimal energy efficient work pattern for vibratory roller // Journal of Physics: Conference Series, Omsk, 23–24 апреля 2019 года. Vol. 1260, 11. Omsk: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 112020. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1260/11/112020>

6. Баженов В.Г., Котов В. Л. Математическое моделирование нестационарных процессов удара и проникания осесимметричных тел и идентификация свойств грунтовых сред. М : ФИЗМАТЛИТ, 2011. 208 с.

7. Козлов В.В. Лагранжева механика и сухое трение // Нелинейная динамика. 2010. Т. 6, № 4:855–868.

8. Тарасов В.Н., Бояркина И.В., Серебренников В.С. Модуль деформации грунтов при уплотнении дорожным катком легкого типа // Строительные и дорожные машины. 2019. № 3:25–30.

9. Савельев С.В., Михеев В.В. Исследования деформирования упруго-вязкой среды при ударном нагружении // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2012. № 4(26):100–103.

10. Paulmichl I., Adam Ch., Adam D. Analytical modeling of the stick-slip motion of an oscillation

drum // *Acta Mechanica*. 2019. Vol. 230, No. 9:3103-3126. <https://doi.org/10.1007/s00707-019-02454-3>. EDN VQNCJJ.

11. Yuan Ma, Wei Lu, Ying-cheng Luan, Tao Ma, Chuan-le Wang. Research on global optimization mechanism of intelligent compaction parameters of soil subgrade based on difference method // *Journal of Building Engineering*. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.108381>

12. Мотова М.И., Шалфеев В.Д. От теории колебаний – к нелинейной динамике // *Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика*. 2014. Т. 22, № 1:93–103. <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2014-22-1-93-103>. EDN SWKELJ.

13. Qinwu Xu, George K. Chang. Evaluation of intelligent compaction for asphalt materials // *Automation in Construction*. 2013. 104-112. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.11.015>

14. Ma Y., Chen F., Ma T., Huang X., Zhang Y. Intelligent compaction: An improved quality monitoring and control of asphalt pavement construction technology // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2021. Т. 23. № 9:14875-14882.

15. Xu C., Chen Z., Li J., Xiao Y. Compaction of subgrade by high-energy impact rollers on an airport runway // *Journal of performance of constructed facilities*. 2014. Т. 28. № 5. Pp. 04014021.

16. Stepień J, Chomicz-Kowalska A, Tutaj-Dudala M, Dudala M, Maciejewski K, Ramiaczek P, Iwanski MM. Influence of Compaction Methods on Properties of Roller-Compacted Concrete Pavement Wearing Surfaces. *Materials*. 2025; 18(3):492. <https://doi.org/10.3390/ma18030492>

17. Shi M., Wang J., Li Q., Cui Bo., Guan Sh., Zeng T. Accelerated earth-rockfill dam compaction by collaborative operation of unmanned roller fleet // *Journal of Construction Engineering and Management*. 2022. Т. 148. № 7. Pp. 04022046.

18. Jiao Yu., Zhao R., Chen Ye.H., Jiao Sh., Zhang X. A switched servo constraints control for the smart vibratory roller in unmanned compaction // *Automation in Construction*. 2023. Т. 152. Pp. 104883.

19. Головин О.В. Вибрационные машины // *Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова: сборник докладов, Белгород, 20–21 мая 2024 года. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2024. С. 48–52. EDN XPTLQV.*

20. Савельев С.В., Сачук Ю.С., Литовченко Р.Е. Обоснование параметров вибрационного пневмошинного катка для уплотнения грунтов при строительстве автодорог // *Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)*. 2023. № 2(73). С. 33–39. EDN GYZEFE.

21. Jonsson A. Modelling, simulation and experimental investigation of a rammer compactor machine // *Department of Mechanical Engineering Blekinge Institute of Technology, Sweden, 2001. 24 p.*

22. Зеленков Г.А., Каратаева Н.Г. Математическое моделирование в процессе формирования профессиональных компетенций // *Вестник Воро-*

нежского государственного технического университета. 2014. Т. 10, № 5-2. С. 76–79. EDN UHGVPF.

23. Савельев С.В., Михеев В.В., Сачук Ю.С. Эффективность использования вибрации в пневмошинных дорожных катках при устройстве автомобильных дорог // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2023. № 12. С. 640–644. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-12-640-641>. EDN XVSTAZ.

24. Yao Y., Ruan Y., Chen J., Geng Y. Research on a real-time monitoring platform for compaction of high embankment in airport engineering // *Journal of Construction Engineering and Management*. 2018. Т. 144. № 1. С. 04017096.

25. Zhang X., Luo T., Song Er.Bo., Geng Yi. Algorithm for optimal path planning of impact roller in high-embankment airport // *Japanese Geotechnical Society Special Publication*. 2020. Т. 8. № 5:159-163.

26. Kuenzel R., Mueller M., Teizer J., Blickle A. SmartSite: Intelligent and autonomous environments, machinery, and processes to realize smart road construction projects // *Automation in Construction*. 2016. Т. 71:21-33.

27. Шишкин Е.А. Метод расчета фазового угла между вынуждающей силой вибровозбудителя и перемещением вальца // *Вестник СибАДИ*. 2024. Т. 21, № 3(97):388–394. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-388-394>. EDN HQAJCW.

28. Тюремнов И.С., Шорохов Д.А. Моделирование взаимодействия вибрационного катка с уплотняемым грунтом // *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета*. 2024. Т. 21, № 2(96). С. 202–216. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-202-216>. EDN BSOEFX.

29. 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. EDN STVNAD.

30. Xuefei Wang, Xiangdong Li, Jiale Li, Jianmin Zhang, Guowei Ma. Training strategy and intelligent model for in-situ rapid measurement of subgrade compactness // *Automation in Construction*. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105581>.

31. Речицкий А.С., Речицкий С.В. Сравнительный анализ уплотнения дорожными катками с различными рабочими органами // *Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта*. 2024. № 1(12):79–85. https://doi.org/10.52170/2712-9195_2024_1_79. EDN FINDAC.

32. Клигунова З.А., Шишкин Е.А., Клигунов Е.С. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния грунта в процессе уплотнения дорожным катком // *Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство*. 2024. № 25: 67–72. <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2024-25-67-72>. EDN SGRHRN.

REFERENCES

1. Tjurenov I.S. Analiz tehnikeskikh harakteristik razlichnyh tipov udarno-vibracionnyh grun-

- touplotnjajushhih mashin. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*. 2023; T. 20, № 6(94):706-716. (in Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-706-716>. EDN IGOKXE.
2. Saveliev S.V., Permyakov V.B., Mikheev V.V., Poteryaev I.K.. Innovative compaction equipment and recommendations for its use for resource-saving technologies in road construction. Omsk: Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), 2019; 193 p. (in Russ.)
 3. Shishkin E.A., Ivanchenko S.N., Sidorkov V.V. [et al.] Study of the relationship between the design and technological parameters of vibratory and oscillating rollers. *Scientific and Technical Bulletin of Bryansk State University*. 2021; No. 2. P. 183-188. (in Russ.)
 4. Zaychenko S.V. Study of rheological characteristics of soil and concrete mixtures during their compaction. News of higher educational institutions. *Mining journal*. 2014; No. 7. P. 112-119. (in Russ.)
 5. Kligunova Z.A., Shishkin E.A., Kligunov E.S. Matematicheskoe modelirovanie naprjazhenno-deformirovannogo sostojaniya grunta v processe uplotneniya dorozhnym katkom. *Transportnoe, gornoe i stroitel'noe mashinostroenie: nauka i proizvodstvo*. 2024; № 25. S. 67-72. <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2024-25-67-72>. EDN SGRHRN.
 6. Bazhenov V.G., Kotov V.L. Mathematical modeling of non-stationary processes of impact and penetration of axisymmetric bodies and identification of properties of soil media. M: FIZMATLIT, 2011; 208 p. (in Russ.)
 7. Kozlov V.V., Lagrangian mechanics and dry friction. *Nonlinear Dynamics*, 2010; Vol. 6, No. 4, pp. 855–868. (in Russ.)
 8. Tarasov V.N., Boyarkina I.V., Serebrennikov V.S. Soil deformation modulus during compaction by a light-duty road roller. *Construction and road machinery*. 2019; No. 3. P. 25-30. (in Russ.)
 9. Saveliev S.V., Mikheev V.V. Research of deformation of elastic-viscous medium under impact loading. *Bulletin of the Siberian State Automobile and Highway Academy*. 2012; No. 4 (26). P. 100-103. (in Russ.)
 10. Paulmichl I., Adam Ch., Adam D. Analytical modeling of the stick-slip motion of an oscillation drum. *Acta Mechanica*. 2019; Vol. 230, No. 9:3103-3126. <https://doi.org/10.1007/s00707-019-02454-3>. EDN VQNCJJ.
 11. Yuan Ma, Wei Lu, Ying-cheng Luan, Tao Ma, Chuan-le Wang. Research on global optimization mechanism of intelligent compaction parameters of soil subgrade based on difference method. *Journal of Building Engineering*. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108381>
 12. Motova M.I., Shalfeev V.D. Ot teorii kolebanij - k nelinejnoj dinamike. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Prikladnaja nelinejnaja dinamika*. 2014. T. 22, № 1. S. 93-103. <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2014-22-1-93-103>. EDN SWKELJ. (in Russ.)
 13. Qinwu Xu, George K. Chang. Evaluation of intelligent compaction for asphalt materials. *Automation in Construction*. 2013. Pp. 104-112. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.11.015>
 14. Ma Y., Chen F., Ma T., Huang X., Zhang Y. Intelligent compaction: An improved quality monitoring and control of asphalt pavement construction technology. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2021. T. 23. №. 96 14875-14882.
 15. Xu C., Chen Z., Li J., Xiao Y. Compaction of subgrade by high-energy impact rollers on an airport runway. *Journal of performance of constructed facilities*. 2014. T. 28. №. 5. Pp. 04014021.
 16. Stepień J., Chomicz-Kowalska A., Tutaj-Dudala M., Dudala M., Maciejewski K., Ramiączek P., Iwanski MM. Influence of Compaction Methods on Properties of Roller-Compacted Concrete Pavement Wearing Surfaces. *Materials*. 2025; 18(3):492. <https://doi.org/10.3390/ma18030492>
 17. Shi M., Wang J., Li Q., Cui Bo., Guan Sh., Zeng T. Accelerated earth-rockfill dam compaction by collaborative operation of unmanned roller fleet. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2022. T. 148. № 7. Pp. 04022046.
 18. Jiao Yu., Zhao R., Chen Ye.H., Jiao Sh., Zhang X. A switched servo constraints control for the smart vibratory roller in unmanned compaction. *Automation in Construction*. 2023. T. 152. Pp. 104883.
 19. Golovin O.V. Vibracionnye mashiny. Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija molodyh uchenykh BGTU im. V.G. Shuhova : Sbornik dokladov, Belgorod, 20–21 maja 2024 goda. Belgorod: Belgorodskij gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet im. V.G. Shuhova, 2024; S. 48-52. EDN XPTLQV. (in Russ.)
 20. Savel'ev S.V., Sachuk Ju.S., Litovchenko R.E.. Obosnovanie parametrov vibracionnogo pnevmoshinnogo katka dlja uplotnenija gruntov pri stroitel'stve avtodorog. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta (MADI)*. 2023. №2(73). S.33-39. EDN GYZEFE. (in Russ.)
 21. Jonsson A. Modelling, simulation and experimental investigation of a rammer compactor machine. Department of Mechanical Engineering Blekinge Institute of Technology, Sweden, 2001. 24 p.
 22. Zelenkov G.A., Karataeva. N.G. Matematicheskoe modelirovanie v processe formirovaniya profesional'nyh kompetencij. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta*. 2014; T. 10, № 5-2. S. 76-79. EDN UHGVPF. (in Russ.)
 23. Savel'ev S.V., Miheev V.V., Sachuk Ju.S. Jefferktivnost' ispol'zovaniya vibracii v pnevmoshinnyh dorozhnyh katkah pri ustrojstve avtomobil'nyh dorog. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki*. 2023; № 12. S. 640-644. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-12-640-641>. EDN XVSTAZ. (in Russ.)
 24. Yao Y., Ruan Y., Chen J., Geng Y. Research on a real-time monitoring platform for compaction of high embankment in airport engineering. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2018; T. 144. №. 1. C. 04017096.
 25. Zhang X., Luo T., Song Er.Bo., Geng Yi. Algorithm for optimal path planning of impact roller in high-embankment airport. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*. 2020; T. 8. №. 5. C. 159-163.

26. Kuenzel R., Mueller M., Teizer J., Blickle A. SmartSite: Intelligent and autonomous environments, machinery, and processes to realize smart road construction projects. *Automation in Construction*. 2016; T. 71. C. 21-33.

27. Shishkin E.A. The method for calculating phase angle between exciter force of vibration exciter and roller displacement. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21(3): 388–394. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-388-394>. EDN: HQAJCW.

28. Tjurennov I.S., Shorohov D.A. Modelirovanie vzaimodejstviya vibracionnogo katka s uplotnjajemyim gruntom. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*. 2024; T. 21, № 2(96). S. 202-216. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-202-216>. EDN BSOEFX. (in Russ.)

29. Tjurennov I.S., Ignat'ev A.A., Filatov I.S. Statisticheskij analiz tehnicheskikh harakteristik gruntovyh vibracionnyh katkov. *Vestnik Tihookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2014; № 3(34). S. 81-88. EDN STVNAD. (in Russ.)

30. Xuefei Wang, Xiangdong Li, Jiale Li, Jianmin Zhang, Guowei Ma. Training strategy and intelligent model for in-situ rapid measurement of subgrade compactness. *Automation in Construction*. 2024; <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105581>

31. Rechitskiy A.S., Rechitskiy S.V. Comparative analysis of compaction by road rollers with different screeds Fundamental and applied transport issues. 2024; 1(12): 79–85. (In Russ.) https://doi.org/10.52170/2712-9195_2024_1_79. EDNFINDAC.

32. Kligunova Z.A., Shishkin E.A., Kligunov E.S. Mathematical modeling of the stress-strain state of the soil in the process of compaction by a road roller. *Transport, mining and construction engineering: science and production*. 2024; 25: 67–72. (In Russ.) <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2024-25-67-72>. EDN SGRHRN.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Савельев С.В. Разработка модели и анализ результатов (25%).

Мухеев В.В. Разработка модели и анализ результатов (25%).

Потеряев И.К. Проведение обзора (25%).

Савельев А.С. Проведение обзора (25%).

CO-AUTHORS' CONTRIBUTION

Savelyev S.V. Development of the model and analysis of the results (25%).

Miheev V.V. Development of the model and analysis of the results (25%).

Poteryaev I.K. Conducting the literature review (25%).

Savelyev A.S. Conducting the literature review (25%).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Савельев Сергей Валерьевич – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Эксплуатация нефтегазовой и строительной техники» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (644050, г. Омск, пр. Мира, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4034-2457>,

Scopus Author: 57159787800,

Researcher ID: A-4081-2019,

SPIN-код: 4135-8370,

e-mail: saveliev_sergval@mail.ru

Мухеев Виталий Викторович – д-р техн. наук, доц., проф. кафедры «Комплексная защита информации» Омского государственного технического университета (ОмГТУ) (644050, г. Омск, пр. Мира, 11).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8881-5404>,

Scopus Author: 7102121335,

Researcher ID: S-5724-2016,

SPIN-код: 2272-6944,

e-mail: vvm125@mail.ru

Потеряев Илья Константинович – канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Эксплуатация нефтегазовой и строительной техники» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (644050, г. Омск, пр. Мира, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4350-2495>,

Scopus Author: 57203586410,

Researcher ID: W-7052-2018,

SPIN-код: 3684-9850,

e-mail: poteryaev_ik@mail.ru

Савельев Андрей Сергеевич – студент Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (644050, г. Омск, пр. Мира, 5).

e-mail: savelevandrej914@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Saveliev Sergey V. – Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor at the Department of Oil and Gas and Construction Machinery, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospect Mira, Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4034-2457>,

Scopus Author: 57159787800,

Researcher ID: A-4081-2019,

SPIN-code: 4135-8370,

e-mail: saveliev_sergval@mail.ru

Mikheev Vitaly V. – Dr. Sci. (Engineering), Assistant Professor, Professor at the Department of Comprehensive Information Security, Omsk State Technical University (11, Prospect Mira, Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8881-5404>,

Scopus Author: 7102121335,

Researcher ID: S-5724-2016,

SPIN-код: 2272-6944,

e-mail: vvm125@mail.ru

Poteryaev Ilya K. – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, head of the Department of Oil and Gas and Construction Machinery, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospect Mira, Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4350-2495>,

Scopus Author: 57203586410,

Researcher ID: W-7052-2018,

SPIN-code: 3684-9850,

e-mail: poteryaev_ik@mail.ru

Savelyev Andrey S. – undergraduate student, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospect Mira, Omsk, 644050).

e-mail: savelevandrej914@gmail.com